CHOMSKY PROTÉINE FANTÔME ÉMOTIONS RÉALITÉ VIRTUELLE DR WATSON
VERRE DE VIN MÉTÉORITE BOLTZMANN CRYOVOLCAN FRAUDE SPERMATOZOÏDE

SCIENCE & VIE

NOVEMBRE 2016 N° 1190 MONDADORI FRANCE

DANS 10 MILLIONS, 10 MILLIARDS D'ANNÉES

DEMAIN LA TERRE

RÉVÉLATIONS SUR NOTRE FUTUR

D : 6,90 € - BEL : 4,80 € - ESP : 4,90 € - GR : 4,90 € - DOM S : 4,90 € - DOM A : 6,90 € ITA : 4,90 € - LUX : 4,80 € - PORT CONT : 4,90 € - CAN : 6,75 $ CAN - MAR : 50 DH TOM S : 750 CFP - TOM A : 1 400 CFP CH : 8,50 FS - TUN : 9 DTU



\+

CHIRURGIE

20% DES INTERVENTIONS SONT INUTILES !

ROBOTS VIVANTS

LES PREMIERS SPÉCIMENS SORTENT DES LABOS

PEUPLE NAIN

IL A RÉGNÉ 600 000 ANS SUR L'ÎLE DE FLORES

Avant-propos

SCIENCE&VIE





Héloïse Rambert
h.rambert@mondadori.fr

Abus de chirurgie

De plus en plus de voix s'élèvent chaque année au moment d'Octobre Rose pour réclamer un débat sur le surdiagnostic du cancer du sein et les abus de traitements, en particulier chirurgicaux, qui en découlent. Durant mon enquête, j'ai réalisé que le surtraitement se nichait partout et que ses origines étaient multiples. Laissant l'impression d'une sorte de dérive de notre façon de penser le soin.

Vincent Nouyrigat
v.nouyrigat@mondadori.fr

Au-delà de l'anthropocentrisme

Bien sûr, il est nécessaire et utile de parler du réchauffement climatique, de la destruction de la biosphère ou de la surconsommation des ressources naturelles. Mais voilà : sous couvert de s'intéresser au sort de la planète, on en vient finalement à parler beaucoup de nous, les Hommes ! En oubliant que notre passage sur Terre, aussi pétaradant soit-il, n'est que furtif – l'existence des paysages et des animaux que nous chérissons est tout aussi fugace. Depuis longtemps, nous voulions parler de notre planète autrement. Pas sur le court terme d'une civilisation humaine, mais à l'échelle des 5 milliards d'années qu'il lui reste à vivre (soit plus de 60 millions de générations humaines). Vertigineux.



Thomas Cavaillé-Fol
t.cavaillé-fol@mondadori.fr

A la rencontre d'une légende

Enquêter sur *Homo floresiensis*, l'homme nain de l'île de Flores, c'est découvrir toute une nouvelle mythologie. Sa naissance, sa merveilleuse évolution, les animaux fantastiques qui partageaient son quotidien… Tout semble concurrencer les romans et légendes qui circulent sur le peuple nain. Sauf que ce nouveau conte n'est pas issu de notre imaginaire, mais de l'interprétation bien scientifique d'ossements fossiles. Nous avons eu de la chance de les découvrir, car ils nous enseignent une histoire évolutive bien plus magique que prévu. Et cette histoire, c'est aussi la nôtre.

DR

COUVERTURE : D. VAN RAVENSWAAY/SPL/COSMOS

SCIENCE & VIE 8, rue François-Ory 92543 Montrouge Cedex
Tél. : 01 46 48 48 48 - Fax : 01 46 48 48 67
E-mail : svmens@mondadori.fr
Recevez *Science & Vie* chez vous. **Votre bulletin d'abonnement se trouve p. 129.** Pour commander d'anciens numéros, rendez-vous sur www.kiosquemag.com. Vous pouvez aussi vous abonner par téléphone au 01 46 48 48 96, ou par Internet sur www.kiosquemag.com.

Un catalogue Boutique Science & Vie Noël est jeté sur les exemplaires de toute la diffusion abonnés France Métropolitaine.

Actus

Evénement

A la Une

Science & découvertes

Science & techniques

Science & futur

La science & la vie

Forum

Merci d'adresser vos courriers à : sev.lecteurs@mondadori.fr



Allô la Terre, ici Alpha du Centaure…

Dans votre dossier sur le projet d'envoyer une mini-sonde vers Alpha du Centaure (n° 1188 de septembre), il me semble qu'il manque un défi : la précision de l'orientation du faisceau de communication vers la Terre. En effet, une fois arrivée à destination, la mini-sonde sera incapable de discerner notre planète. L'orientation du faisceau pourra toujours se baser sur le Soleil, mais viser une cible de 1 km sur Terre implique de connaître la position théorique de celle-ci par rapport à notre étoile avec une précision redoutable ! Or, le mouvement terrestre est soumis à beaucoup d'incertitudes…

Denis Corbin, internet

S&V En fait, la sonde n'aura pas besoin de "discerner" la Terre pour orienter son laser de communication. La position du Soleil devrait suffire, car la divergence du faisceau laser sera suffisamment grande pour trouver notre planète même sans la viser précisément. *"Et si besoin, la sonde pourra utiliser le faisceau laser émis depuis la Terre pour se diriger plus finement"*, ajoute Philip Lubin, l'un des membres du projet Breakthrough Starshot à l'université de Santa Barbara. C'est bien la réception des données qui constituera le vrai défi : à cause de la distance et de la divergence du faisceau, le signal de la sonde aura en effet perdu une grande partie de son intensité à son arrivée sur Terre. Les capteurs au sol devront donc être sensibles au moindre photon…

> Envoyer des sondes de 2 g à 0,2 fois la vitesse de la lumière, n'est-ce pas un peu agressif comme première approche ? Ces sondes auront chacune l'énergie d'une météorite de 20 t, ou d'une (grosse) balle de fusil de 7 000 t !

***Yannick Lapchin**, ingénieur chez Altran (Toulouse)*

Asimov avait déjà eu cette idée

Dans votre article intitulé "Nous allons transformer un astéroïde en vaisseau" (n° 1189), vous écrivez : *"L'idée semble tout droit sortie d'un livre de science-fiction – quoique, à notre connaissance, elle n'ait jusqu'ici jamais été imaginée…"*. Eh bien si ! Par Isaac Asimov dans une nouvelle de 1955, *La Voie martienne*, où un énorme bloc de glace était ainsi ramené de Saturne à Mars. Les livres de science-fiction de cette époque gagneraient à être lus : ils contiennent les prémices des inventions et des changements de notre société.

Gérard Desboist, Asnières-sur-Seine (92)

Une méthode moyenâgeuse !

J'ai été choquée par l'article "La Nouvelle-Zélande veut éradiquer ses prédateurs" (n° 1189, p. 28). On parle quand même d'éradication totale d'espèces, autrement dit de milliers d'individus! Vous me direz qu'il s'agit de nuisibles, qui s'attaquent à la fois à l'environnement et aux autres espèces endémiques de ce pays, et qu'il vaut donc mieux les faire disparaître avant qu'il soit trop tard. Mais vous auriez dû aborder cet article avec un peu plus de recul et de nuances quant à la méthode adoptée, qui reste moyenâgeuse et cruelle.

Justine Lejeune, Marseille

Le futur métro parisien : innovant, vraiment ?

Au sujet de votre article sur le futur métro parisien (n° 1189, p. 104), je voulais vous rappeler que le freinage rhéostatique existe depuis des décennies sur les locomotives électriques. Dans les années 1970, j'ai roulé par exemple entre Sotteville-lès-Rouen et Paris, et cela fonctionnait très bien.

Rudy Gore, Yvrac (33)

S&V En effet, dans le ferroviaire, cela fait longtemps que l'énergie dissipée sur les locomotives électriques aboutit soit dans des résistances, soit dans les caténaires, où elle peut être récupérée. Mais dans le cas du projet de métro parisien, le dispositif est tout autre (sans caténaire). Alstom et ses partenaires sont en train de mettre au point un nouveau système de freinage, sur lequel peu d'informations circulent, mais qui permettrait une récupération d'énergie significative : 20 % de baisse de la consommation par rapport aux rames les plus technologiquement avancées ! Rendez-vous sur le terrain en 2019 pour en savoir plus.

On en reparle


FONDAMENTAL DÉCOUVERTE

PLEINE LUNE

ELLE NOUS EMPÊCHE BEL ET BIEN DE DORMIR

Malgré la croyance populaire, personne n'avait jamais prouvé que la pleine lune influe sur notre comportement. Jusqu'à ce que des chercheurs suisses démontrent qu'elle affecte notre sommeil. Et pas qu'un peu ! Une totale surprise...

PAR SIMON DEVOS

Le chercheur en est resté abasourdi. Il en a passé des heures plongé dans ses statistiques à la recherche de la moindre erreur cachée. *"Nous étions tous perplexes à propos de nos résultats"* admet-il aujourd'hui. *Pour être franc, je n'attendais vraiment rien de cette étude."* Mais avec ses collègues de l'université de Bâle en Suisse, le chronobiologiste Christian Cajochen s'est finalement fait une raison et il a publié ses résultats en bonne et due forme : aux alentours de la pleine lune, tous les 29 jours environ, notre sommeil se trouve raccourci d'une vingtaine de minutes, sa qualité est revue à la baisse et il ne s'agit pas d'une simple impression. Nous subissons de plein fouet les effets de la pleine lune, un peu comme des loups-garous.

Il y a de quoi rester perplexe. Augmentation du nombre d'accouchements, agressivité des animaux ou pics de violence : l'effet de la pleine lune fait l'objet de nombreuses croyances populaires ; mais celles-ci ont jusqu'ici été systématiquement rejetées par des études statistiques (voir encadré). Certes, il existe bien quelques rares animaux marins, coraux, mollusques et poissons, dont on sait qu'ils sont influencés par les phases de la lune : mâles et femelles se calent sur la lumière de la pleine lune pour synchroniser leurs émissions de gamètes et ainsi maximiser les chances de fécondation. Mais ces cas restent isolés et jusqu'à présent personne n'avait pu prouver que les mammifères ou même n'importe quel animal terrestre soient influencés de la sorte. L'étude suisse apparaît donc comme une grande première scientifique.

PRESQUE PAR HASARD

A l'origine, Christian Cajochen et ses collègues étudiaient l'influence de l'âge et du sexe sur la qualité du sommeil. Entre 2000 et 2003, ils ont enregistré plusieurs paramètres associés au sommeil de 33 participants en laboratoire. Ce n'est que six ans plus tard, réunis un soir dans un bar, qu'ils décident de revenir sur leurs données pour les comparer avec le cycle lunaire. *"A plusieurs reprises nous avions entendu parler de personnes souffrant de troubles du sommeil les soirs de pleine lune*, raconte Christian Cajochen. *Cela nous a amusés et nous étions curieux de savoir si ce phénomène transparaissait dans notre étude."* Et la corrélation n'a pas tardé à apparaître : *"A notre grande surprise, le sommeil de nos volontaires semblait tout à fait affecté par le cycle lunaire."*

Les chiffres parlent d'eux-mêmes (voir courbes pages suivantes). Le temps total de sommeil et le temps avant endormissement chez les volontaires étaient affectés les nuits où la lune est ronde. En moyenne, les participants mettaient cinq minutes de plus à s'endormir les nuits de pleine lune et leur temps total de sommeil était réduit de vingt minutes. D'autre part, le taux de mélatonine, une hor →

JARGON

La Lune est pleine lorsqu'elle se trouve à l'opposé du Soleil par rapport à la Terre. Elle nous apparaît entière car toute sa surface nous renvoie la lumière de l'astre du jour. La luminosité de nuit est donc maximale sur Terre. Notre planète est également attirée d'un côté et de l'autre par les deux astres, ce qui provoque l'apparition des grandes marées.

94 | S&V | OCTOBRE | 2013

2013 | OCTOBRE | S&V | 95

LA PLEINE LUNE INFLUENCERAIT AUSSI LES NAISSANCES

La pleine lune fait l'objet de nombreuses croyances populaires, qui n'ont presque jamais été confirmées par la science. Nous relations un des rares contre-exemples dans notre n° 1153 d'octobre 2013 : une étude sur le sommeil semblait indiquer que celui-ci était influencé par le cycle lunaire.

Aujourd'hui, une équipe japonaise clame avoir trouvé un nouveau lien étonnant, cette fois entre les phases de la lune et… le nombre de naissances – une croyance assez répandue dans le milieu hospitalier. *"L'homme n'était pas le cobaye idéal pour cette étude, car trop de facteurs peuvent affecter nos naissances : environnementaux, nutritionnels, socioculturels…"*, relate Tomohiro Yonezawa, de l'université de Tokyo. Le chercheur s'est donc concentré sur une espèce plus simple : les vaches. Résultat, après trois ans d'étude et 428 naissances : le nombre de ces dernières croît lentement de la nouvelle à la pleine lune, où elle atteint un maximum, puis décroît brusquement jusqu'au dernier croissant, avec un rapport qui va du simple au double – ce rapport étant plus important pour les vaches qui n'en sont pas à leur premier vêlage.

Si les chiffres sont sans équivoque, le scientifique n'avance pour l'instant qu'une vague hypothèse pour expliquer un tel résultat : *"La mélatonine, hormone du sommeil sécrétée en plus faible quantité au moment de la pleine lune, pourrait peut-être avoir un lien avec cette hausse des naissances."* Cela reste à confirmer…

S. Devos

On en reparle

Bébé à 3 ADN
Plongée dans l'inconnu

LE PREMIER BÉBÉ À TROIS “PARENTS” EST NÉ

Nous vous annoncions la possibilité d'une telle révolution en avril 2015 (*S&V* n° 1171). Un an plus tard, le premier bébé à trois “parents” naissait ! Les médecins viennent de l'annoncer. L'enfant, âgé aujourd'hui de 6 mois, possède comme chacun de nous 23 paires de chromosomes, issues à parts égales de son père et de sa mère. Mais d'autres brins d'ADN présents dans ses cellules, appelés ADN mitochondrial et provenant normalement de la mère, sont issus, dans son cas, d'une donneuse. La mère étant porteuse de mutations dans son ADN mitochondrial, elle risquait en effet de transmettre une grave maladie à son enfant en cas de conception naturelle. Des médecins américains ont donc procédé à une technique préalablement testée sur des souris et des macaques : ils ont transféré le noyau (contenant les chromosomes) de l'ovocyte de la mère vers l'ovocyte d'une donneuse dont ils avaient préalablement retiré le noyau, puis ils ont fécondé cet ovocyte hybride avec un spermatozoïde du père.

Pour l'instant, les médecins affirment que l'enfant va bien, et que presque aucun ADN mitochondrial de la mère ne lui a été transféré accidentellement. Si la réussite est confirmée, cette intervention, qui a eu lieu au Mexique, où aucune réglementation ne l'interdit, pourrait accélérer l'autorisation et l'utilisation de la technique ailleurs (actuellement, elle n'est autorisée qu'au Royaume-Uni). Mais son innocuité ne sera garantie qu'une fois l'enfant suivi pendant plusieurs dizaines d'années…

E. Abdoun

Les vaccins, une enquête orientée ?



Comme beaucoup de Français, je me pose des questions concernant les vaccins. En lisant votre article (n° 1188, p. 76), je n'ai pas trouvé de quoi alimenter ma réflexion. Votre parti pris pro-vaccination ne permet pas de se forger une idée équilibrée. Vous parlez des conséquences d'un arrêt de la vaccination, ce qui n'est pas à l'ordre du jour. Les chiffres présentés ne sont pas mis en perspective par rapport à l'incidence d'autres maladies sans vaccin. Des cas uniques sont donnés à titre d'exemples pour apporter un effet dramatique. Et surtout, il n'est fait aucune mention des effets indésirables ! Nous avons besoin d'un maximum d'objectivité sur les sujets qui nous concernent directement.

Samuel Val, Saint-Pierre-Eynac (43)

S&V Votre réaction soulève la difficulté de parler de vaccination en si peu de place. Nous avons choisi de nous appuyer sur des exemples concrets, dans des contextes similaires à celui de la France d'aujourd'hui, non pour apporter un effet dramatique, mais pour mieux cerner le risque qu'il y aurait aujourd'hui à cesser de se vacciner dans notre pays. Nous évoquons les problèmes des effets secondaires immédiats, notamment pour la coqueluche.

C'est précisément parce que la vaccination est au cœur des préoccupations de nombreux Français que nous avons décidé de lui consacrer un hors-série (à paraître début décembre), dans lequel, nous l'espérons, vous trouverez les réponses à vos questions.

Par ailleurs, plusieurs lecteurs nous ont fait remarquer que nous avions utilisé le terme “mortalité” pour évoquer la létalité, soit le nombre de décès dus à une maladie par rapport au nombre de patients atteints par cette maladie. De fait, le tétanos ne peut avoir un taux de mortalité de 25 %, car cela signifierait que 25 % des Français mourraient de cette maladie ! Nous avons voulu éviter un terme peu connu (létalité), mais nous aurions dû préciser “taux de mortalité par cas d'infection”.



SCIENCE & VIE

Une publication du groupe MONDADORI FRANCE

RÉDACTION
8, rue François-Ory
92543 Montrouge CEDEX.
Tél. : 01 46 48 48 48 - Fax : 01 46 48 48 67
E-mail : svmens@mondadori.fr

DIRECTEUR DE LA RÉDACTION
Matthieu Villiers,
assisté de Christelle Borelli

RÉDACTEUR EN CHEF
Hervé Poirier

RÉDACTEUR EN CHEF ADJOINT
Grégoire Bouillier (chef d'édition)

DIRECTRICE ARTISTIQUE
Yvonne Diraison

CHEFS DE SERVICE
Valérie Greffoz (actualités, société),
Caroline Tourbe (médecine)

CHEF DE RUBRIQUE
Muriel Valin (technologies)

RÉDACTEURS
Elsa Abdoun, Thomas Cavaillé-Fol, Mathilde Fontez, Vincent Nouyrigat, Emilie Rauscher

SECRÉTAIRE GÉNÉRALE DE RÉDACTION
Florence Roucolle

SECRÉTAIRES DE RÉDACTION
Anne Riera, Clara Baudel

MAQUETTISTES
Valérie Samuel-Charrier (1re maquettiste),
Elisabeth de Garrigues

SERVICE PHOTO-INFOGRAPHIE
Anne Levy (chef de service photo),
Katia Davidoff, Boris Bellanger
(chef de service infographie)

DOCUMENTATION
Marie-Anne Guffroy, Frédéric Vladyslav

ONT COLLABORÉ À CE NUMÉRO
S. Aquindo, L. Barnéoud, K. Bettayeb,
L. Blancard, F. Cadu, O. Capronnier,
G. Cirade, M. Corniou, A. Dagan,
A. Debroise, S. Devos, O. Donnars,
S. Fay, L. Gougis, F. Gracci, E. Haentjens,
C. Hancok, M. Kontente, O. Lapirot,
H. Leroux, E. Leroy-Terquem, C. Martin,
M.-C. Mérat, E. Monnier, M.-A. Pelaez,
B. Perrin, N. Picard, A. Pihen,
H. Rambert, B. Rey, Y. Sciama, M. Spée,
O. Surcouf, E. Thierry-Aymé, A. Vernet

DIRECTION-ÉDITION

DIRECTION PÔLE
Carole Fagot

DIRECTEUR DÉLÉGUÉ
Vincent Cousin

DIFFUSION
Jean-Charles Guérault (directeur diffusion),
Siham Daassa (responsable diffusion marché)

MARKETING/INTERNATIONAL
Giliane Douls, Mathilde Janier-Bonnichon,
Michèle Guillet

PUBLICITÉ

DIRECTEUR EXÉCUTIF
Valérie Camy

CONTACTS PUBLICITÉ
Virginie Commun (50 28),
Lionel Dufour (50 19)

PLANNING
Angélique Consoli (53 52),
Stéphanie Guillard (53 50)

TRAFIC
Stéphane Durand (53 12)

OPÉRATIONS SPÉCIALES
Jean-Jacques Benezech (19 83)
Grande-Bretagne : Publieurope LTD
(infolodon@publieurope.com –
44 (0)20 7927 9800) ;
Allemagne : Publieurope Munich
(infomunich@publieurope.com
0049 89 2908150) ;
Suisse : Publieurope Lausanne
(infolausanne@publieurope.com
0041 21 323 3110) ;
Espagne : Publimedia Madrid
(infomadrid@publim-gestion.es
0034 91 212 83 00)

FABRICATION
Daniel Rougier,
Agnès Châtelet

FINANCE MANAGER
Guillaume Zaneskis

ÉDITEUR
MONDADORI MAGAZINES FRANCE
Siège social : 8, rue François-Ory
92543 Montrouge Cedex
DIRECTEUR DE LA PUBLICATION
Carmine Perna
ACTIONNAIRE PRINCIPAL
Mondadori France SAS

IMPRIMEUR : ELCOGRAF – ITALIE
N° ISSN : 0036-8 369
N° DE COMMISSION PARITAIRE :
1020 K 79977. Tarif d'abonnement légal :
1 an, 12 numéros : 44,80 €
1 an, 12 numéros + 6 HS : 64,80 €
Dépôt légal : novembre 2016

ABONNEMENTS
Christophe Ruet (directeur),
Catherine Grimaud (directrice marketing direct)
Johanne Gavarini (responsable marketing direct)

RELATIONS CLIENTÈLE ABONNÉS
Par téléphone : 01 46 48 48 96
Par courrier :
SERVICE ABONNEMENTS SCIENCE & VIE,
CS 90125 - 27091 EVREUX CEDEX 9
Pour vous abonner par internet :
www.kiosquemag.com
Etats-Unis et Canada : Express Mag,
Tél. : 1 800 363-1310 (français)
et 1 877 363-1310 (anglais).
Suisse : Edigroup, 022 860 84 50
mondadori-suisse@edigroup.ch.
Belgique : Edigroup Belgique, 070 233 304
mondadori-belgique@edigroup.be
Autres pays : nous consulter.

À NOS ABONNÉS
Pour toute correspondance relative à votre abonnement, merci d'indiquer votre numéro d'abonné présent sur le film ainsi que vos coordonnées. Les noms, prénoms et adresses sont communiqués à nos services internes et organismes liés contractuellement avec S&V sauf opposition motivée. Les informations pourront faire l'objet d'un droit d'accès ou de rectification dans le cadre légal. Les manuscrits envoyés ne sont pas rendus.

À NOS LECTEURS

RENSEIGNEMENTS
Par courrier :
8, rue François-Ory,
92543 Montrouge
Cedex
Par mail : sev.lecteurs@
mondadori.fr

COMMANDE D'ANCIENS NUMÉROS, RELIURES ET VPC
Tel : 01 46 48 48 83
Contact@laboutiquescienceetvie.com







SHUTTERSTOCK

Dans les kiosques

LES FEMMES DU MOYEN ÂGE



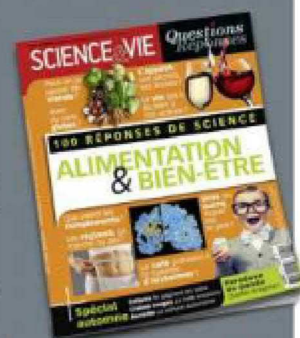
Quelle était la condition des femmes au Moyen Age ? Loin des idées reçues, ce numéro spécial rétablit la vérité historique, en dévoilant une condition féminine qui, entre le Ve et le XVe siècles, fut passionnante, car autant “libérée” qu'asservie. Une période unique, pleine d'enseignements.
Les Cahiers de Science & Vie, 5,95 €

ENVIES D'ESPACE



Construire une base lunaire ? Coloniser Mars ? Plonger dans les océans d'Europe et de Titan ? Ce hors-série détaille 10 des projets parmi les plus fascinants de ce XXIe siècle. Tous n'iront sans doute pas à leur terme. D'autres, auxquels personne n'a encore songé, s'inviteront probablement dans la course. Une chose est sûre : la conquête spatiale n'a pas fini de faire rêver les Terriens !
Hors-série de Science & Vie, 4,95 €

ALIMENTATION & BIEN-ÊTRE



Notre traditionnelle édition trimestrielle regroupant 100 questions/réponses passe à table. On y tord le cou à certaines idées reçues et on s'attarde sur quelques bonnes questions dont les réponses ne coulent pas de source. Les régimes, ça marche ? Manger bio, c'est mieux ? Le vin est-il bon pour la santé ? Est-il vrai que le café prévient la maladie d'Alzheimer ? Peut-on se passer de viande ?...
Science & Vie Questions/Réponses, 4,50 €

actus



> V Pour la première fois, des chercheurs ont filmé l'instant qui précède l'entrée du spermatozoïde dans l'ovule ; pour que la fusion ait lieu, sa queue doit osciller au rythme de 2 battements par seconde, avec une amplitude de 20°.



EYE OF SCIENCE/SCIENCE PHOTO LIBRARY/COSMOS - RAVAUX ET GOURIER

REPRODUCTION

LE MOMENT CLÉ DE LA FÉCONDATION SE DÉVOILE ENFIN

Les battements de queue du spermatozoïde ne lui servent pas seulement à se mouvoir et à remporter la course jusqu'à l'ovule. Ils lui permettent aussi de fusionner avec lui. Telle est la surprenante découverte réalisée par Benjamin Ravaux et Christine Gourier, à l'ENS (Paris). *"Une fois le spermatozoïde arrivé au contact de l'ovocyte, on pensait que les mouvements de sa queue, le flagelle, devenaient inutiles, voire qu'ils risquaient de détacher les deux cellules sexuelles*, explique Christine Gourier. *C'est en fait tout le contraire ! Grâce à ces battements, la tête du spermatozoïde oscille contre la membrane de l'ovocyte et exerce une contrainte mécanique, une sorte de massage. Sans cette contrainte, la fusion des deux cellules sexuelles n'a pas lieu."* Les chercheurs, qui ont dû imaginer un dispositif en forme de coquetier pour canaliser les spermatozoïdes et pouvoir ainsi les observer au moment crucial – ce qui est extrêmement difficile – ont en outre montré que ces battements doivent remplir deux critères bien précis pour que la fusion puisse avoir lieu. *"Seuls les spermatozoïdes capables de maintenir une cadence de 2 battements par seconde et une amplitude d'une vingtaine de degrés perpendiculairement à la surface de l'ovocyte ont une chance de fusionner avec celui-ci"*, précise la chercheuse. De la mécanique de précision. **C.H.**

PLANÉTOLOGIE

SUR CÉRÈS CULMINE LE SEUL VOLCAN DE GLACE CONNU DU SYSTÈME SOLAIRE

Il y a à peine 210 millions d'années, ce volcan était encore en éruption. Mais au lieu de cracher des panaches de gaz et de cendres ou des coulées de lave brûlante, il expulsait… de la glace d'eau! Ahuna Mons est le premier cryovolcan formellement identifié du système solaire. Il trône sur Cérès, une planète naine de 950 km de diamètre qui orbite dans la ceinture d'astéroïdes, entre Mars et Jupiter. La sonde *Dawn* de la Nasa, en orbite autour de Cérès depuis plus d'un an, a examiné cet étrange monticule isolé de 4 km de hauteur, dont la dépression en son sommet, signe d'un ancien cratère, et les traces d'écoulement sur ses flancs ne laissent aucun doute. Selon les chercheurs américains du Goddard Space Flight Center, le volcan aurait craché des panaches de glace salée à −43 °C à l'époque où le cœur radioactif de Cérès était encore assez chaud pour rendre visqueuse la glace qu'il renferme. Elle se serait alors frayé un chemin vers la surface jusqu'à cette zone précise où la croûte de la planète était fragilisée par un impact d'astéroïde… qui s'était produit du côté opposé! *"Les ondes de choc se seraient propagées à travers la planète pour reconverger en ce point précis et fracturer la surface"*, explique Emmanuel Lellouch, spécialiste du sujet à l'Observatoire de Meudon. D'après lui, aucune chance qu'on assiste à de nouvelles éruptions: la source d'énergie du cœur de Cérès doit être complètement épuisée. Le cryovolcan est endormi pour l'éternité. **B.R.**

LINGUISTIQUE

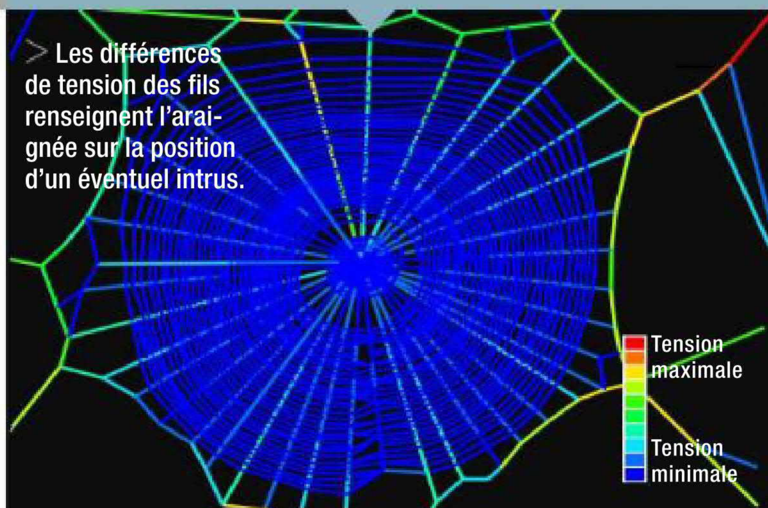
Quelle que soit la langue, son et sens sont souvent liés

"Burun" en turc, "deguns" en letton, "naak" en hindi… Parmi les milliers de langues parlées dans le monde, les mots désignant le nez contiennent souvent le son [n]. Le qualificatif "petit", lui, est fréquemment associé au son [i]. En étudiant plus de 6 000 listes de mots, une équipe internationale de chercheurs a démontré que de telles associations entre fond et forme sont loin d'être marginales. Certains sons symboliseraient plus facilement certains sens, en raison, notamment, des expressions faciales que nécessite leur production. L'association du son [m] aux mots liés à la maternité pourrait ainsi s'expliquer par la forme de la bouche des bébés allaités, ou par le son qu'ils produisent. **E.A.**

PHYSIQUE

L'araignée "accorde" sa toile

Des scientifiques anglais et espagnols ont reproduit en laboratoire, puis mesuré au laser, de légères vibrations sur la toile de l'araignée *Araneus Diadematus*, mimant l'action du vent, de proies, de partenaires ou de prédateurs. Ils ont observé que les vibrations se propagent sous la forme d'ondes transversales et longitudinales, les premières influencées par la tension du fil, les secondes par la rigidité de la soie – deux paramètres que l'araignée sait parfaitement moduler lorsqu'elle tisse sa toile! Elle optimise ainsi la transmission des ondes qui la renseigneront sur la source et la distance de la perturbation. **E.H.**



> Les différences de tension des fils renseignent l'araignée sur la position d'un éventuel intrus.

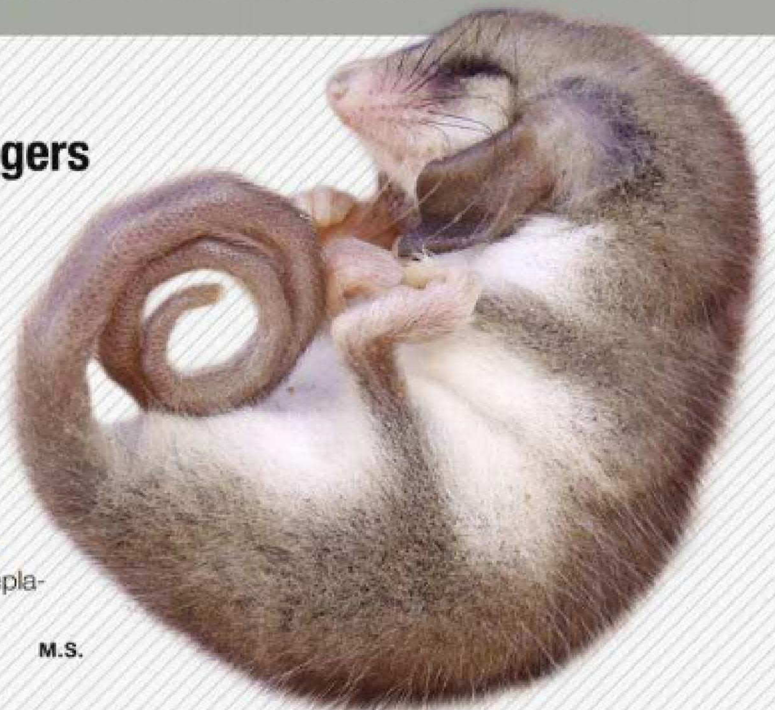
< Le cratère au sommet de ce mont haut de 4 km ne laisse pas de doute : il s'agit d'un ancien volcan… qui crachait de la glace.

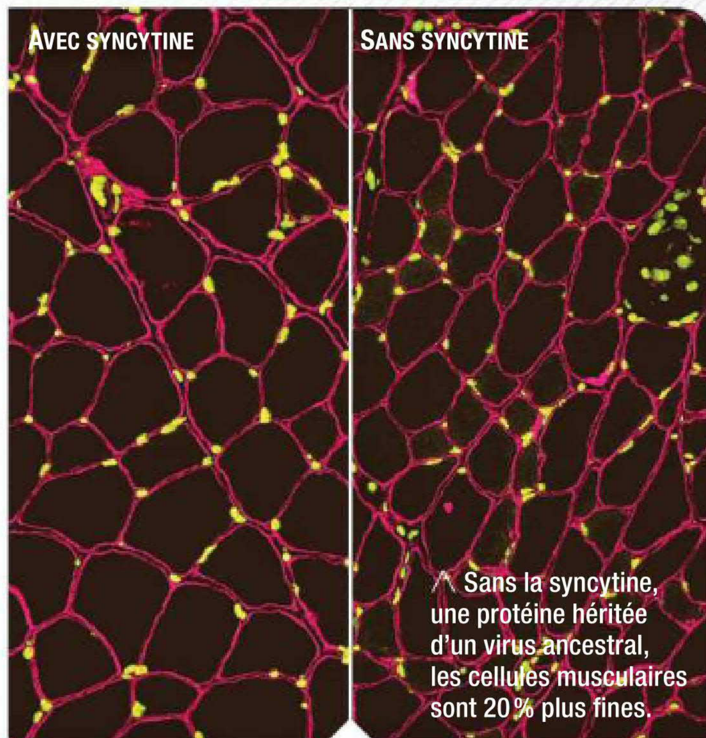
NASA - A.SOLER2016./UNIVERSITY OF OXFORD - D.R.

PHYSIOLOGIE ANIMALE

Même en hibernant, les phalangers pygmées sentent le danger

Dans les forêts australiennes, les phalangers pygmées, de petits marsupiaux, peuvent hiberner n'importe quand : leur température diminue, leur cœur ralentit… Mais même dans cet état, en cas d'incendie, ils sont capables de détecter le danger et de fuir, révèlent des chercheurs australiens. Et ce, d'autant plus que la température de l'air – qui influe sur celle de leur corps – est élevée. Ainsi, si on les expose à de la fumée quand leur température corporelle est de 13 °C (10 °C à l'extérieur), rien ne se passe ; à 18 °C, certains commencent à se déplacer ; enfin, à 24 °C, tous cherchent un refuge en altitude. Ils échappent donc mieux à un incendie l'été que l'hiver. **M.S.**





Sans la syncytine, une protéine héritée d'un virus ancestral, les cellules musculaires sont 20 % plus fines.

BIOLOGIE CELLULAIRE

SI LES MÂLES SONT PLUS MUSCLÉS, C'EST GRÂCE À UN VIRUS

Dans nos cellules, nombreux sont les gènes issus de rétrovirus ancestraux qui ont été intégrés à notre ADN au cours de l'évolution. Si la plupart sont défectueux, l'un d'eux serait responsable de l'une des différences les plus visibles entre les sexes : les muscles plus développés des mâles ! Il s'agit du gène de la syncytine, une protéine présente dans l'enveloppe des rétrovirus qui possède la capacité de fusionner deux cellules entre elles. Identifiée en 2009 par l'équipe de Thierry Heidmann, à l'Institut Gustave Roussy (Villejuif), elle s'était révélée essentielle au développement du placenta chez les mammifères. Or, la même équipe vient de lui découvrir un autre effet : lorsqu'on désactive son expression chez une souris, sa masse musculaire fond de 20 % ! *"Muscle et placenta résultent de la fusion de nombreuses cellules*, précise Thierry Heidmann. *En favorisant ces fusions, la syncytine a apporté un avantage évolutif indéniable."* Quant à expliquer pourquoi seuls les mâles profitent de cet effet sur les muscles… L'expression de la syncytine est sans doute régulée de manière hormonale, et diffère donc selon le sexe. **E.H.**

en bref

LE BLUE-JEAN VIENT DU PÉROU

Les plus anciennes traces d'indigo ont été découvertes sur un tissu en coton de 6 000 ans retrouvé sur le site de Huaca Prieta. Ce qui avance de 1 500 ans la première utilisation de la célèbre teinture bleue, attribuée jusqu'ici aux Egyptiens. **V.G.**

QUI S'ASSEMBLE SE RESSEMBLE (DE L'INTÉRIEUR)

Alors que dans la nature, les singes hurleurs d'Amérique du Sud et les doucs d'Asie du Sud-Est ont une flore bactérienne bien distincte, en captivité, leurs microbiotes finissent par ressembler étrangement à celui d'un autre primate… l'homme. **C.H.**

DES GUÊPES POUR DATER L'ART RUPESTRE

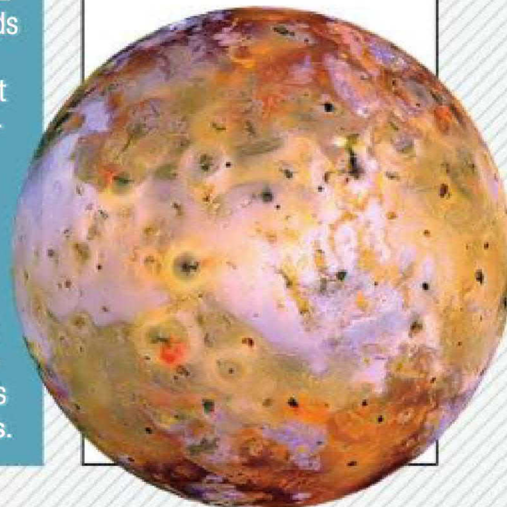
Fossilisés, les nids des guêpes maçonnes perdurent des milliers d'années. En les datant au carbone 14, des chercheurs ont pu estimer à 35 000 ans l'âge de fresques australiennes situées en dessous. **M.S.**

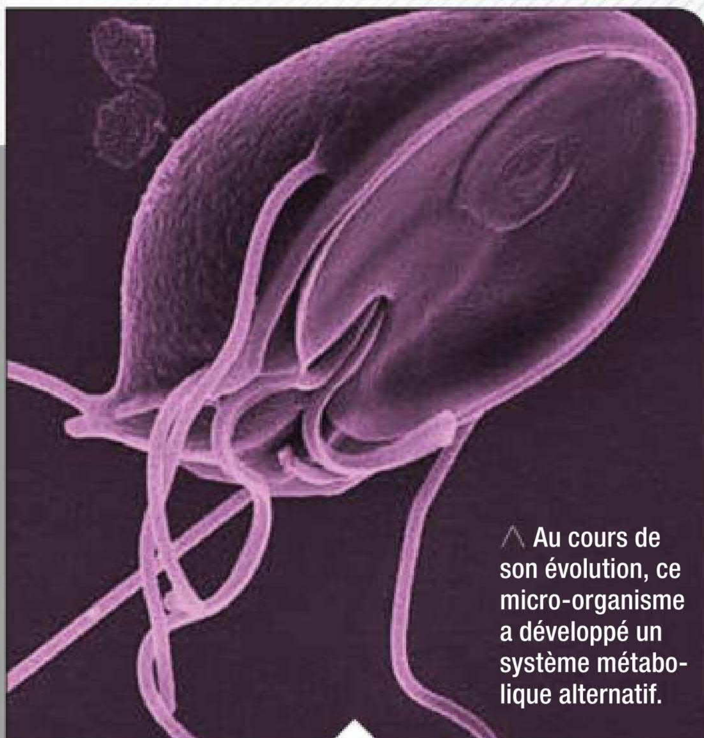
ASTROPHYSIQUE

L'atmosphère d'Io gèle toutes les 42 heures

Drôle de météo sur Io ! Lorsque cette lune de Jupiter passe dans l'ombre de la planète géante, toutes les 42 heures, son atmosphère s'effondre… *"La perte d'ensoleillement fait brutalement chuter la température à – 168 °C*, explique Emmanuel Lellouch, à l'Observatoire de Meudon. *C'est assez froid pour que le dioxyde de soufre* [SO_2] *se condense sur le sol, le couvrant d'un fin tapis blanc."* Ce gaz, craché par les volcans d'Io, l'enrobe d'une couche atmosphérique extrêmement ténue, dont l'évolution a pu être étudiée grâce au télescope Gemini, à Hawaï. Lorsque le soleil revient, le tapis de SO_2 se vaporise à nouveau, et l'atmosphère se reconstitue comme si de rien n'était… **B.R.**

La température de cette lune de Jupiter chute à – 168 °C une fois par orbite.




Au cours de son évolution, ce micro-organisme a développé un système métabolique alternatif.

GÉNÉTIQUE

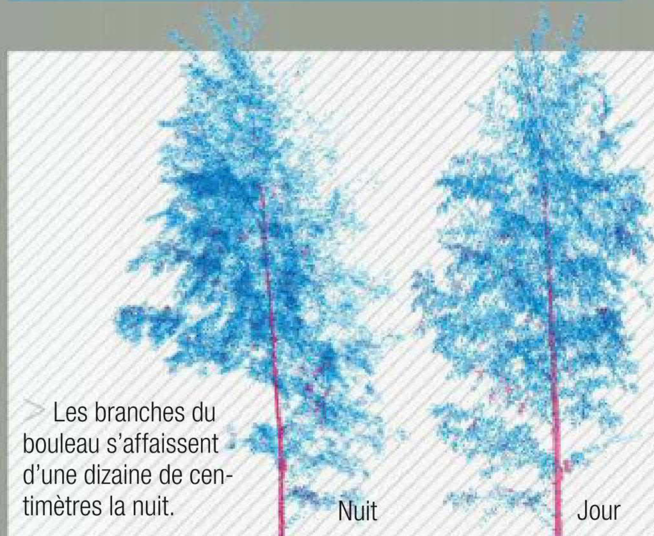
L'histoire des premiers Américains fait fausse route

L'équipe d'Eske Willerslev (université de Cambridge) doute que les premiers hommes arrivés en Amérique soient passés par une langue de terre libérée par la glaciation au niveau du détroit de Béring, entre Sibérie et Alaska – c'était l'hypothèse admise. Cernée de glace, elle n'aurait pu offrir ni faune ni flore capable de nourrir des voyageurs avant 11000 av. J.-C. Des traces d'habitations plus anciennes étant toutefois connues sur le continent, une autre voie, sur la côte pacifique, est à considérer, suggère l'équipe. **O.D.**

BIOLOGIE CELLULAIRE

IL EXISTE UN EUCARYOTE SANS MITOCHONDRIES

Un paradigme s'effondre. Les mitochondries ne sont pas indispensables à la vie des eucaryotes, les organismes – comme nous – dont les cellules possèdent une membrane autour de leur noyau ! Le protozoaire *Monocercomonoides* sp. PA 203 est en effet dépourvu de ces "centrales énergétiques" cellulaires. C'est en séquençant le génome de ce micro-organisme anaérobie (qui vit sans oxygène) que Vladimir Hampl, parasitologue à l'université Charles de Prague, a constaté l'absence de protéines mitochondriales. Aucune trace, notamment, de la chaîne d'assemblage des protéines fer-soufre, qui jouent un rôle clé dans le métabolisme cellulaire. Le chercheur a en revanche découvert la présence d'un système alternatif de mobilisation du soufre, remplissant les mêmes fonctions. Ce système aurait été acquis par transfert de gènes bactériens. *"Les analyses phylogénétiques* [relatives à l'évolution des espèces et à leur degré de parenté] *de ces protéines montrent que les plus proches enzymes connus viennent de bactéries"*, explique-t-il. C'est à la suite de cette acquisition de matériel génétique que le protozoaire aurait perdu ses mitochondries, devenues superflues. **E.L.-T.**

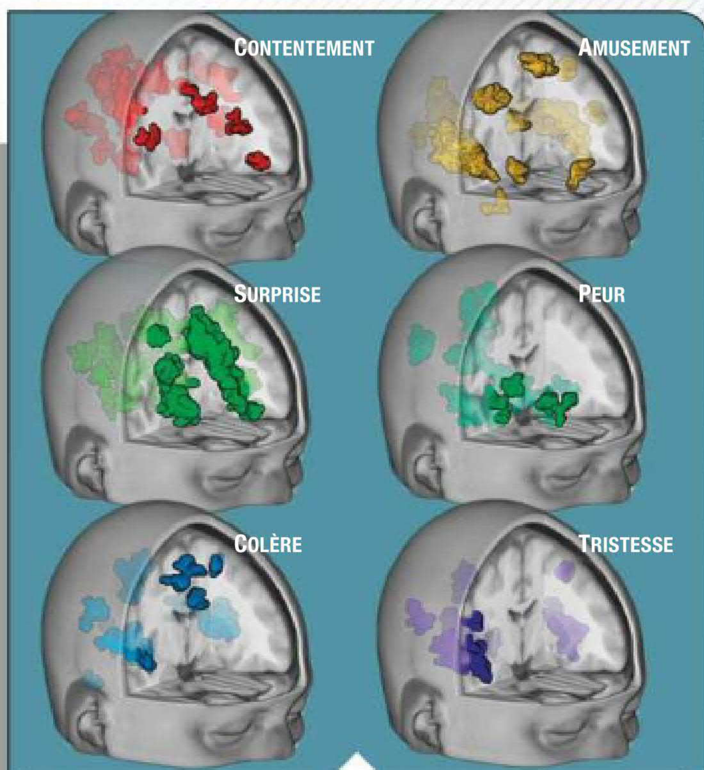


Les branches du bouleau s'affaissent d'une dizaine de centimètres la nuit.

BOTANIQUE

Les arbres aussi se reposent la nuit

En observant des bouleaux la nuit, au scanner laser et sans lumière artificielle, le chercheur finlandais Eetu Puttonen a remarqué que leurs branches s'affaissent en moyenne d'une dizaine de centimètres par rapport au jour. *"Le cycle circadien du mouvement des plantes est documenté depuis la fin du XIXe siècle, mais c'est la première fois que l'on détecte clairement le mouvement des branches d'un arbre"*, souligne-t-il. Selon lui, cet affaissement résulterait d'une baisse de la pression en eau dans les cellules végétales, liée à l'interruption de la photosynthèse pendant la nuit. **E.L.-T.**



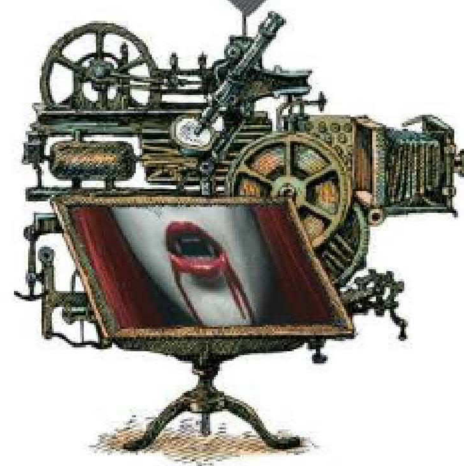
NEUROLOGIE

SIX ÉMOTIONS PEUVENT SE LIRE DANS LE CERVEAU

Tristesse, amusement, peur, colère, contentement et surprise: voilà les six états que l'équipe de Kevin LaBar, psychologue à l'université Duke, a réussi à observer dans notre cerveau à l'aide d'une technique d'imagerie, l'IRMf. Des vidéos et des morceaux de musique censés susciter ces six émotions ont été présentés à 32 personnes, afin d'entraîner un logiciel à reconnaître les zones cérébrales qui s'activaient. Fonctionnant comme une intelligence artificielle, ce logiciel a appris à détecter les émotions dans le cerveau. Pour preuve: toujours sous IRM, 21 participants ont laissé divaguer leurs pensées et déclaré ce qu'ils éprouvaient toutes les trente secondes. Et le logiciel a reconnu chaque émotion dans les dix secondes précédant la déclaration, avec un taux de réussite entre 60 % (peur) et 80 % (contentement) ! Ce résultat pourrait d'ores et déjà servir au diagnostic et à l'étude de la dépression. Patrik Vuilleumier, neuroscientifique à l'université de Genève, explique: *"Les patients déprimés ont tendance à revenir plus lentement à l'état neutre après avoir éprouvé de la tristesse, par exemple"*. Désormais, cela se lit dans le cerveau. **F.G.**

K.S. LABAR/DUKE UNIVERSITY - FOTOLIA - S. AQUINDO

Drôle de science



Un vampire boirait votre sang en six minutes seulement

Enfin, six minutes et vingt-quatre secondes plus précisément : c'est le temps qu'il lui faudrait pour aspirer 15 % des 5 litres de sang que contient le corps humain. Pourquoi 15 % ? Parce qu'au-delà de ce seuil, le système vasculaire de la victime commencerait à se dérégler et elle risquerait d'y passer, ce qui priverait son agresseur de futures et précieuses collectes – notre vampire étant plutôt du genre prévoyant. A l'occasion du 85e anniversaire du tournage du film *Dracula*, de Tod Browning, des étudiants britanniques de l'université de Leicester, pas effrayés pour un sou, se sont livrés à quelques calculs. Ils ont d'abord mesuré la largeur des trous que perceraient deux canines assoiffées de sang, soit 0,5 mm. Puis, à l'aide d'équations de mécanique des fluides, ils ont calculé la vitesse du sang s'écoulant par l'artère carotide externe, là où le débit est le plus important – en plus d'être prévoyant, notre vampire est efficace. Résultat : s'il ne fait que boire à la source, il avalera la quantité maximale qu'il s'autorise (soit 0,75 l) en six minutes et vingt-quatre secondes. Mais s'il est dérangé et qu'il doit prendre la poudre d'escampette, il lui faudra aspirer pour accélérer le débit. **A.D.**



ÉCOTOXICOLOGIE

LE DÉCLIN DES ABEILLES EST LIÉ À LEUR SPERME

Le déclin des abeilles partout dans le monde est un problème majeur pour l'agriculture, car la qualité de la pollinisation conditionne la plupart des rendements. Une classe d'insecticides, les néonicotinoïdes, est accusée depuis plusieurs années de jouer un rôle important dans le dépérissement des ruches. Mais on pensait jusque-là que c'était la neurotoxicité de ces insecticides (dont le nom révèle la parenté avec la nicotine) qui était fatale aux abeilles. Or, une étude récente menée par une équipe suisse suggère que les néonicotinoïdes agissent aussi… comme un contraceptif masculin! *"Nous nous sommes intéressés au sperme des mâles,* raconte Lars Straub, *parce que les apiculteurs imputaient à de 'mauvaises reines' la majorité de leurs problèmes… alors qu'en fait ils incriminaient la qualité de la reproduction."* Après analyse, il s'est avéré que la quantité de spermatozoïdes vivants produite par des mâles *Apis mellifera* exposés aux néonicotinoïdes baissait de 39 % ! Le chercheur souligne que ces résultats de laboratoire doivent à présent déboucher sur des recherches de terrain. **Y.S.**



Seuls 4 600 gorilles de l'est vivent encore en liberté.

CONSERVATION

Le plus grand primate est en passe

C'est une mauvaise nouvelle de plus qui vient de tomber, pour les grands singes, au dernier congrès mondial de l'Union internationale pour la conservation de la nature : il ne reste plus que 4 600 gorilles de l'est (*Gorilla beringei*) en liberté, ce qui range l'espèce dans la catégorie "en danger critique d'extinction", la plus menacée de toutes sur la grille de l'organisation. Les principaux responsables en sont le braconnage et la guerre civile en République démocratique du

en bref

Les insecticides néonicotinoïdes réduisent la quantité de spermatozoïdes vivants (en bleu) de 39 % chez les mâles *Apis mellifera* (en rose, les spermatozoïdes morts).

de s'éteindre

Congo. Toutefois, l'arrivée en Afrique de plantations d'huile de palme (qui ont causé en Asie la raréfaction brutale des orangs-outans) inquiète aussi les protecteurs de la nature, car elles sont un puissant moteur de déforestation. **Y.S.**

L'OCÉAN A ABSORBÉ 93 % DE LA SURCHAUFFE...

… de la planète au cours des 40 dernières années, selon l'UICN. Ce qui correspond à l'énergie qu'auraient libérée 130 milliards de sèche-cheveux de 1 500 W à plein régime (plus de 300 zettajoules).

LA PLEINE LUNE FAVORISE LES SÉISMES

Selon des chercheurs japonais, les grands séismes se produisent plus fréquemment lorsque les marées sont maximales. C'est, d'après eux, à ce moment-là que les contraintes gravitationnelles de la Lune sur les failles géologiques sont les plus fortes.

IL EXISTE 4 ESPÈCES DE GIRAFES

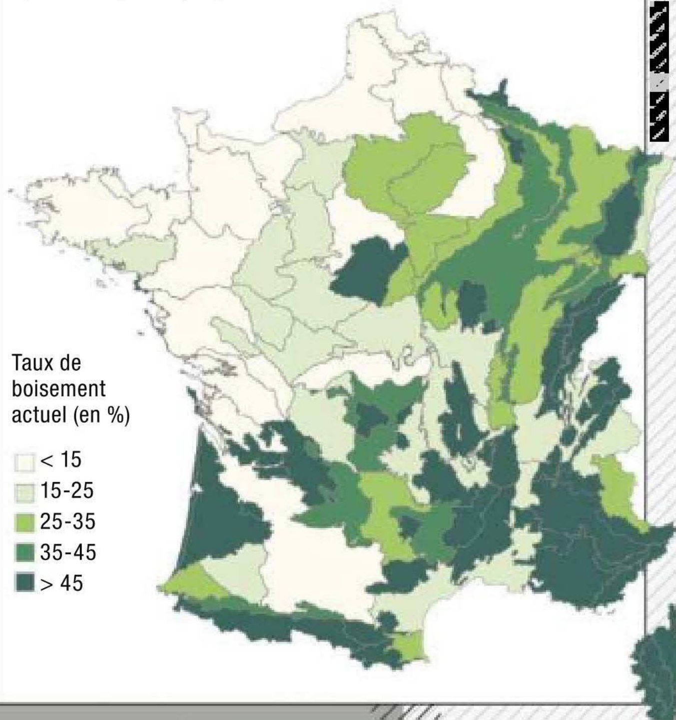
Après analyse de l'ADN de 190 animaux à travers l'Afrique, les généticiens ont tranché : ces quatre espèces, qui se distinguent par de subtiles variations des cornes et de la robe, ne s'hybrident pas dans la nature.

ÉCOLOGIE

La forêt française résiste encore au réchauffement

Face au réchauffement, estimé à + 1,07 °C entre 1965 et 2008 en France, orchidées, violettes et autres plantes herbacées se maintiennent dans les forêts, sans migrer vers le nord. C'est ce que révèle une étude menée par Romain Bertrand, écologue à la Station d'écologie théorique et expérimentale à Moulis (Ariège). Bonne nouvelle ? Pas si sûr. En s'appuyant sur plus de 67 000 relevés floristiques, l'équipe confirme un retard dans la réponse des plantes au réchauffement, surtout en plaine. En quarante ans, les communautés végétales ont peu changé ; on ne compte pas plus d'espèces mieux adaptées à de fortes chaleurs. Pourquoi ? Dans les zones arides, *"pour que des espèces encore plus chaudes s'installent, il faudrait qu'elles viennent d'Espagne ou du Maghreb. Or, la distance est trop importante, sans compter les barrières géographiques : les Pyrénées et la mer"*, détaille Romain Bertrand. Globalement, les plantes sont plutôt dans une phase de résistance que de migration. Mais elles creusent ainsi un retard, qu'elles risquent d'avoir du mal à rattraper quand le réchauffement sera devenu trop important. **M.C.-M.**

La forêt française (son implantation comme les espèces qui la composent) a pour l'instant été peu modifiée.





> Cette industrie se développe rapidement par la multiplication de "fermes" géantes.

AQUACULTURE

LA CULTURE DES ALGUES EST DEVENUE INDUSTRIELLE

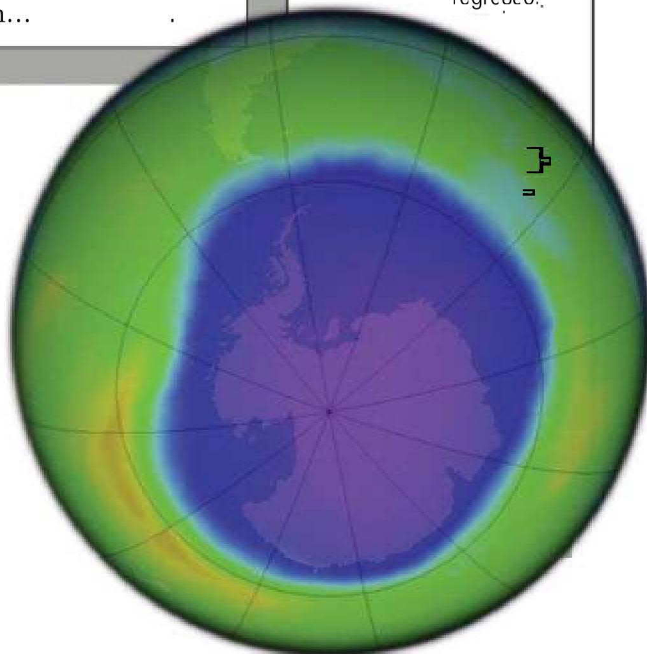
Avec 27 millions de tonnes produites en 2014 et un chiffre d'affaires de 6,4 milliards de dollars, la culture des algues est désormais un poids lourd de la production alimentaire globale. Les trois quarts sont destinés à l'alimentation humaine, le reste se répartit entre nourriture animale, fabrication d'engrais et autres usages. Ciblant l'énorme marché asiatique, cette industrie vient de faire l'objet d'un rapport d'étape signé d'un centre de recherche marine écossais, le SAMS. *"Nous essayons d'y promouvoir des pratiques durables et de la recherche,* indique Elizabeth Cottier, l'une des auteures, *notamment pour écarter le risque posé par les maladies et les parasites, et apprendre des erreurs commises par l'agriculture ou l'élevage industriels."* Les scientifiques développent notamment des pratiques qui intègrent l'aquaculture : l'eau qui sort des fermes de saumons, par exemple, est enrichie en déjections de poissons ; et cultiver des algues à l'aval du courant permet de dépolluer l'eau tout en augmentant la production…

GWANG HOON, ONU-INWEH/SAMS - NASA

SCIENCES DE L'ATMOSPHÈRE

La couche d'ozone se reconstitue

Selon une équipe du MIT américain dirigée par Susan Solomon (ex-présidente du GIEC), le trou de la couche d'ozone donne de clairs signaux de régression : depuis 2000, suite à l'interdiction des CFC, il se serait réduit de 4 millions de kilomètres carrés. Mieux : la couche d'ozone, qui nous protège des rayons ultraviolets, semble suivre les calculs d'un modèle conçu par les chercheurs qui prévoit une "guérison" complète en 2050. **Y.S.**

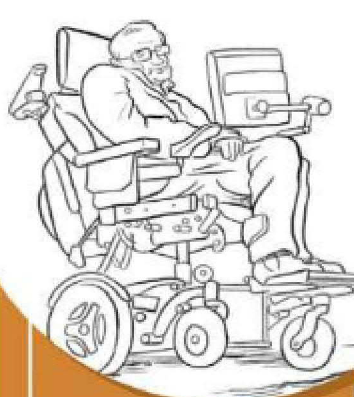


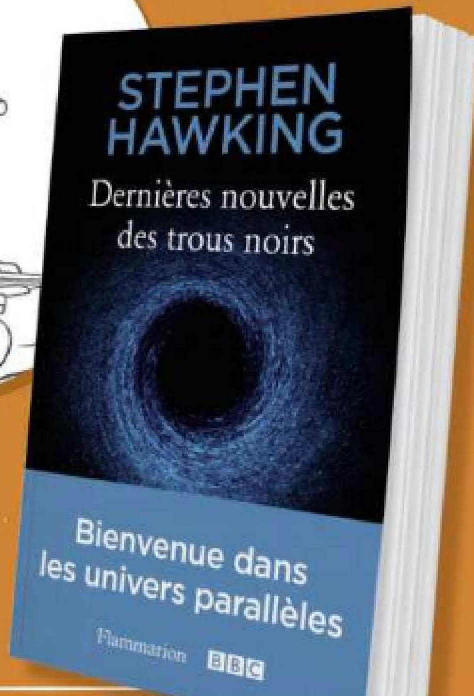
Malgré sa taille encore imposante, le trou d'ozone (ici en octobre 2015) régresse.

1830

C'est la date à laquelle le changement climatique provoqué par l'homme est devenu perceptible. Ce sont les progrès importants dans la reconstruction du climat des cinq derniers siècles qui ont permis de détecter les changements ténus advenus au cours du XIXe siècle. Ils correspondent à une augmentation du CO_2 atmosphérique de 10 ppm, soit à peine 1/40 du niveau actuel.

DERNIÈRES RÉVÉLATIONS SUR LES TROUS NOIRS...





STEPHEN HAWKING est physicien théoricien. Ses ouvrages ont pulvérisé tous les records de vente. *Une merveilleuse histoire du temps*, le biopic à succès qui lui a été consacré en 2014, l'a fait connaître du tout jeune public.

EN LIBRAIRIE – 10 € – 112 PAGES – PRÈS DE 50 ILLUSTRATIONS – FLAMMARION

Le nouveau livre de Stephen Hawking est entièrement placé sous le signe de la singularité. Celle de son contenu d'abord, puisqu'il y est question de la "singularité spatio-temporelle" nichant au cœur d'un trou noir, où le temps et l'espace disparaissent. Singularité de l'auteur ensuite, qui, immobilisé par une sclérose latérale amyotrophique, est l'un des scientifiques les plus importants de notre époque. Singularité du mode d'écriture enfin, léger et fluide, de ce vulgarisateur hors pair, avide de partager sa fabuleuse connaissance du monde physique.

JOUEZ SUR WWW.SCIENCE-ET-VIE.COM
ET TENTEZ DE GAGNER L'UN DES 100 OUVRAGES

Auteur de plus d'une dizaine d'ouvrages de vulgarisation, dont la célèbre Brève histoire du temps (Flammarion, 1988), best-seller mondial vendu à plus de 10 millions d'exemplaires, Stephen Hawking nous entraîne cette fois-ci dans l'histoire récente des trous noirs, qui se confond avec celle de ses propres recherches démarrées dans les années 1960. Car oui ! À 74 ans, même si sa santé l'empêche depuis 2009 de donner des cours à Cambridge, il continue à faire de la physique théorique : "Stephen n'arrête jamais !" nous confie Christophe Galfard, physicien et écrivain, qui fit sa thèse sous sa direction.

Heureusement pour nous, une partie de son énergie,Hawking l'investit dans la transmission au grand public : la narration des Dernières nouvelles des trous noirs est d'une limpidité stupéfiante, dans la pure tradition des écrits de vulgarisation de son illustre prédécesseur, Albert Einstein. S'appuyant sur des images intuitives, il nous fait entrer de plain-pied dans un domaine où, habituellement, le langage et l'intuition atteignent leur limite – mais Hawking n'est-il pas justement celui qui transcende les limites, de la maladie, du temps et de la pensée ?

Avec une écriture enlevée, Hawking nous raconte la vie de ces objets célestes, qui ne seront observés que tardivement par l'astronomie. Dans les années 1920 et 1930, certains théoriciens imaginent déjà la possibilité qu'une étoile s'effondre sur elle-même, jusqu'à devenir un point dans l'espace siège d'une attraction colossale. Rien dans la théorie de la relativité générale (1915) ne s'y oppose, même si le grand Einstein lui-même n'y croit pas.

C'est en 1967 qu'on les baptise "trous noirs" – un terme qui, comme le rappelle malicieusement Hawking, déclenche l'ire des physiciens français car jugé osé, voire obscène !

À l'image du héros d'Interstellar de Christopher Nolan, on franchit au fil des pages le fameux "horizon des événements", fasciné par l'étrange physique qui règne au cœur de ces monstres gravitationnels. L'auteur évoque ensuite la résolution du "paradoxe de l'information", point central de ses recherches dans les années 1970, et cette révélation qu'un trou noir... s'évapore – "découvertes qui sont à la base de la plupart des travaux sur la gravitation quantique de ces quarante dernières années", rappelle Christophe Galfard.

Enfin, Hawking dévoile ses tout derniers résultats. Où l'on apprend que toute l'information happée par un trou noir, possible "passage vers un autre univers", serait encodée sur l'horizon des événements en une sorte d'hologramme à deux dimensions...

Un véritable vertige physique et intellectuel.



CHRISTOPHE GALFARD*

Docteur en physique théorique, Christophe Galfard a été le disciple de Stephen Hawking avec qui il a co-écrit Georges et les secrets de l'Univers. Il nous en dit plus sur le dernier ouvrage de son maître, Dernières nouvelles des trous noirs.

*Auteur de L'Univers à portée de main, en librairie – J'ai Lu

RETROUVEZ L'INTERVIEW INTÉGRALE DE CHRISTOPHE GALFARD SUR WWW.SCIENCE-ET-VIE.COM

DÉMOGRAPHIE

TAILLE DES INDIVIDUS : ON SAIT OÙ ELLE A LE PLUS AUGMENTÉ DEPUIS 100 ANS

Nous sommes bien plus grands que nos aïeux : en cent ans, la taille médiane, à 18 ans, a augmenté de 9,9 cm pour les hommes, et 8,8 cm pour les femmes. C'est ce qui ressort d'une étude menée à l'Imperial College de Londres (R.-U.), sur 18,6 millions d'individus nés entre 1896 et 1996 ! Ce résultat concerne tous les pays, mais pas de la même manière. Les champions toutes catégories sont les Sud-Coréennes (+20,2 cm) et les Iraniens (+16,5 cm). En moyenne, pour les deux sexes, ce sont ensuite le Japon, la Chine et les pays d'Europe du Sud et centrale qui ont connu les plus fortes croissances (entre 13 et 15 cm). L'Afrique subsaharienne et l'Asie du Sud occupent quant à elles le bas du tableau, la poussée de croissance du début du XXe s. ayant subi, dans les dernières décennies, un coup d'arrêt voire une inversion. Si la génétique explique environ un tiers des différences de taille, c'est l'influence de l'environnement qui domine (alimentation, accès à l'eau potable et aux soins, maladies infectieuses). Pour Majid Ezzaoui, coordinateur de l'étude, *"en liant santé, longévité, nutrition, éducation et productivité économique, la taille moyenne des jeunes adultes reflète la santé du pays. Au point qu'elle devrait être considérée comme un indicateur de bien-être des nations"*. **E.H.**



Les écarts de croissance vont de 1 à 8 selon les pays

Evolution (en cm) sur 100 ans de la taille moyenne de la population adulte (à 18 ans) par pays. Elle a été obtenue en comparant la taille de personnes nées en 1896 et en 1996.

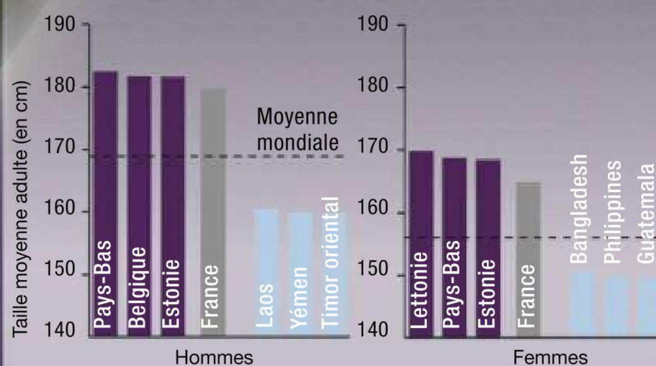


+17,7 cm
Corée du Sud
(croissance max.)

OCÉAN PACIFIQUE

OCÉAN ATLANTIQUE

20 cm séparent aujourd'hui les populations les plus grandes des plus petites



SOURCES : NCD RISK FACTOR COLLABORATION, ELIFE, 2016.

12 cm

C'est la différence de taille moyenne entre un homme et une femme nés en 1996 (1 cm de plus qu'en 1896).

21e

C'est le rang de la France. Elle est 14e pour les hommes (179,7 cm) et 26e pour les femmes (164,9 cm).

-5 cm

C'est ce qu'a perdu la génération de 1996 par rapport à celle de 1956 en Mauritanie, au Rwanda, au Bénin et à Madagascar.

G.CIRADE - B.BELLANGER

PHARMACOLOGIE

LE CORDON OMBILICAL RECÈLE UN ANTI-INFLAMMATOIRE

Une exposition brutale à de nombreuses bactéries : voilà ce que vit un nouveau-né. Comment se fait-il alors que son organisme ne montre aucune inflammation ? Grâce à un anti-inflammatoire présent dans le placenta et fourni au bébé via le cordon ombilical. Découverte par des chercheurs de l'université de l'Utah (E.-U.), cette molécule est capable d'inhiber certaines réactions inflammatoires susceptibles d'endommager l'organisme. Pour la tester, les chercheurs l'ont injectée chez des souris adultes souffrant d'une infection bactérienne. Ils ont alors constaté que le taux de survie des animaux augmentait significativement. Cette découverte pourrait induire de nouveaux traitements, d'autant plus que *"les mécanismes inflammatoires que cette molécule inhibe seraient peut-être impliqués dans des maladies auto-immunes comme la polyarthrite rhumatoïde ou la maladie de Crohn"*, révèle Christian Yost, premier auteur de l'étude. **E.A.**

> Certaines réactions inflammatoires nocives (filets ci-dessus) sont inhibées chez le nouveau-né.

UN LIEN ENTRE AVC ET TABAC

En Finlande, l'incidence des hémorragies méningées, une forme d'accident vasculaire cérébral rare mais mortelle 1 fois sur 2, a diminué de 24 % entre 1998 et 2012. Une baisse que les chercheurs attribuent à celle du tabagisme (–30 % sur la période). **C.H.**

BIENTÔT UN NOUVEL ÉDULCORANT

La brazzéine, une protéine issue d'un fruit d'Afrique de l'Ouest, a un pouvoir sucrant 2000 fois supérieur à celui du sucre. Mais elle est difficile à extraire. Des chercheurs coréens ont trouvé une solution, via des levures OGM. **E.A.**

DÉPISTER LA DÉPRESSION

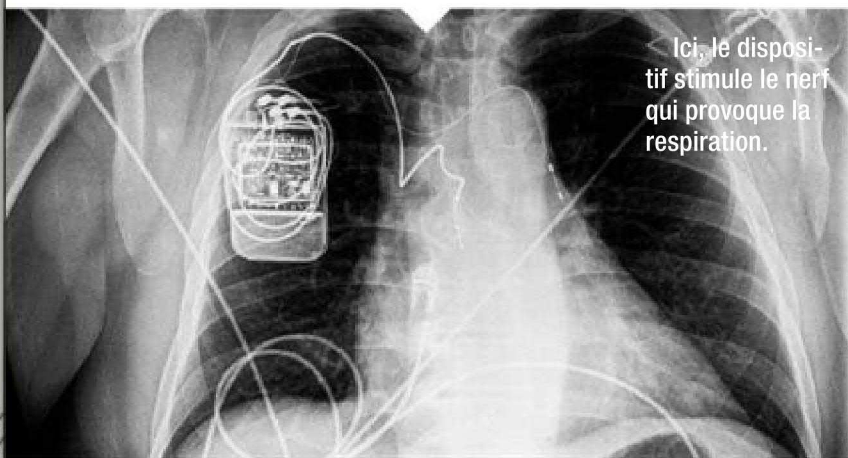
Des chercheurs de l'université d'Alabama (E.-U.) ont constaté la présence très élevée d'une molécule, miR-124-3p, dans le sérum sanguin et le cerveau des dépressifs. Une base pour un futur test de dépistage ? **C.T.**

MARK CODY/DIANA LIM - WILLIAM T. ABRAHAM ET AL. - PLAINPICTURE/MATTON

CHIRURGIE

Un "pacemaker" peut limiter certaines apnées du sommeil

Une expérimentation incluant des patients allemands, polonais et américains souffrant d'apnées centrales du sommeil suggère l'intérêt d'un dispositif de neurostimulation. Comparable à un pacemaker cardiaque, l'appareil, implanté dans une veine, stimule électriquement le nerf phrénique, qui provoque la respiration. Ces 151 patients présentaient au début de l'étude plus de vingt arrêts respiratoires par heure. Tous ont reçu le dispositif, mais ce dernier n'était activé que chez la moitié. Après six mois de traitement, 51 % des patients du groupe "actif" ont vu la fréquence de leurs apnées réduite de moitié ou plus ; ils n'étaient que 11 % dans le groupe "inactif". Dans l'apnée centrale du sommeil, le signal provenant du cerveau qui déclenche la respiration n'est pas envoyé régulièrement. Cette maladie, qui touche environ 4 % de la population, n'a rien à voir avec l'apnée obstructive du sommeil, plus courante, dans laquelle les tissus mous de l'arrière de la gorge empêchent le passage de l'air. **O.C.**



> Ici, le dispositif stimule le nerf qui provoque la respiration.

VIROLOGIE

Le moustique le plus commun en France ne transmet pas Zika

Bonne nouvelle : les moustiques du genre *Culex,* les plus répandus en France, ne peuvent pas transmettre le virus Zika. Après avoir nourri des *Culex* avec du sang de mouton infecté, une équipe de l'université du Kansas (E.-U.) a montré que le virus était incapable de se répliquer dans ces moustiques, condition *sine qua non* pour que le virus gagne les glandes salivaires de l'insecte et soit transmis à sa proie suivante. Les moustiques du genre Aedes, dont le moustique tigre, restent donc les seuls vecteurs de Zika. **C.H.**



> Le moustique *Culex* ne permet pas au virus de se multiplier.


Octobot ne mesure que 6 cm et ses tentacules s'animent grâce à un système pneumatique.

ROBOTIQUE

INNOVE DANS L'AUTONOMIE

Conçu par des chercheurs de l'université Harvard (Etats-Unis), Octobot est le premier robot autonome entièrement composé de matériaux souples. Fabriquée à l'aide d'une technique hybride mêlant moulage, lithographie molle et impression 3D, cette pieuvre en silicone de 6 cm est animée par un système pneumatique. Après injection d'un combustible (peroxyde d'hydrogène) dans ses réservoirs, une réaction chimique produit un gaz qui va gonfler des petites cavités présentes dans ses tentacules. Un réseau de conduits finement calculés agit alors comme une succession de portes logiques permettant d'actionner de façon séquentielle les huit tentacules – deux à droite et deux à gauche à chaque mouvement – pendant quatre à huit minutes. Octobot ouvre la voie à une nouvelle génération de robots qui seront capables de s'adapter morphologiquement à leur environnement et d'atteindre des milieux difficilement accessibles (méthode d'exploration invasive en médecine, etc.). **A.P.**

MATÉRIAU

Un nouveau textile se joue de la sueur

Des chercheurs américains de l'université Stanford ont mis au point un tissu "autorefroidissant" inédit. Constitué de polyéthylène et très fin, il est constellé de trous nanométriques qui laissent passer la transpiration et l'air. Surtout, le polyéthylène évacue les radiations infrarouges, habituellement bloquées par les vêtements. Or, 60 % de la chaleur du corps peut être émise sous cette forme ! Pour Yi Cui et son équipe, le principal défi a été de parvenir à une taille de trous adaptée pour optimiser l'évaporation d'eau sans aboutir à un vêtement transparent ! **H.L.**


Sous ce tissu à trous, la température ressentie est 2,7 °C moindre que dans du coton.

L.SANDERS/HARVARD UNIVERSITY - L.A.CICERO/STANFORD UNIVERSITY

613 km



C'est l'autonomie atteinte par la Tesla Model S : pour la première fois, un véhicule électrique de série affiche une autonomie comparable à celle des voitures à essence. Pour y parvenir, le constructeur a perfectionné sa batterie lithium-ion, dont la capacité est passée de 90 kWh à 100 kWh. H.L.

MÉDICAMENT GÉNÉRIQUE : IL A RÉUSSI TOUTES LES ÉPREUVES



La qualité de fabrication des médicaments génériques est contrôlée entre 600 et 800 fois par an par des autorités indépendantes, en France comme partout dans le monde.

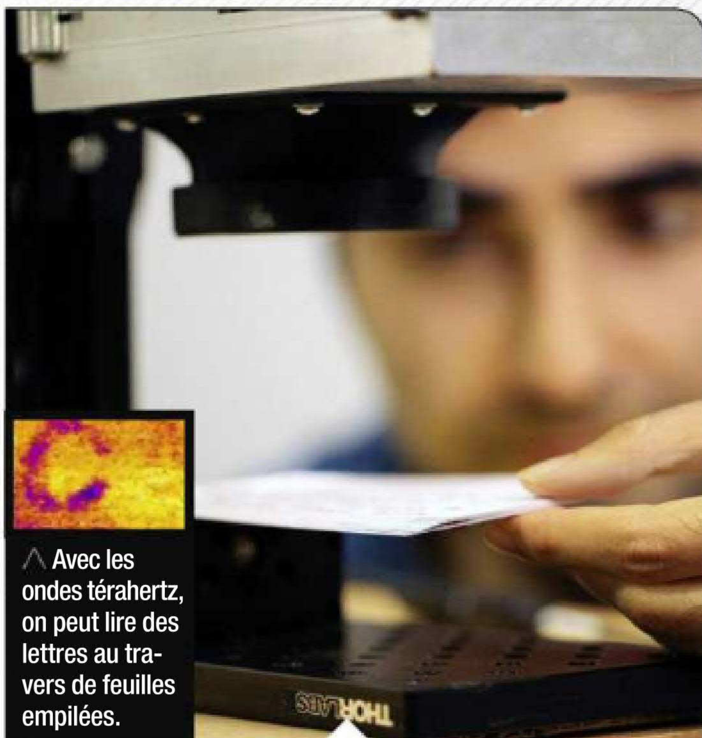
Rendez-vous sur medicaments.gouv.fr

DEVENIR GÉNÉRIQUE ÇA SE MÉRITE

L'Assurance Maladie

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DES AFFAIRES SOCIALES ET DE LA SANTÉ

ansm



Avec les ondes térahertz, on peut lire des lettres au travers de feuilles empilées.

IMAGERIE

DES ONDES PEUVENT LIRE LE CONTENU D'UN LIVRE FERMÉ

Il est parfois impossible d'ouvrir certains livres anciens sans risquer de les endommager. Pour contourner cet obstacle, des chercheurs du MIT ont eu recours à la spectrométrie térahertz, capable de révéler des écrits cachés sous différentes couches de matière. Cette technologie repose sur les ondes électromagnétiques térahertz, ou ondes T. De fréquences de 109 à 1012 Hz, ces ondes sont émises en direction du matériau à analyser ; le signal en retour informe sur les éléments chimiques présents dans les multiples couches. Dans le cas d'un livre, il permet de distinguer le papier vierge de l'encre. Grâce à cette technique, les chercheurs ont pu déchiffrer une pile de 9 feuilles, chacune imprimée d'un caractère. Pour cela, il a fallu localiser, au sein de la pile, l'origine du signal. Puis, pour devenir lisible, ce dernier a dû passer au travers de deux algorithmes qui ont nettoyé le bruit de fond et identifié les lettres. Si la spectrométrie térahertz permet déjà d'analyser d'autres matériaux en feuillets, comme les enrobages de médicaments, elle comblera, à terme, la curiosité des conservateurs de musée ! **A.V.**

BARMAK HESHMAT/MIT MEDIA LAB - INSTITUT PASTEUR

en bref

À L'ÉCOUTE DE MARS

C'est une première ! Le rover de la mission Mars 2020 sera équipé d'un micro qui captera l'environnement sonore sur la planète rouge, ainsi que ses bruits propres, pour vérifier son état. **S.F.**

IMPRESSION 3D RECORD

La plus grande pièce jamais imprimée en 3D mesure 5,33 m de longueur, 1,68 m de largeur et 0,46 m de hauteur. Destinée au futur Boeing 777X, elle a été réalisée à l'Oak Ridge National Laboratory (E.-U.) en une trentaine d'heures. **S.F.**

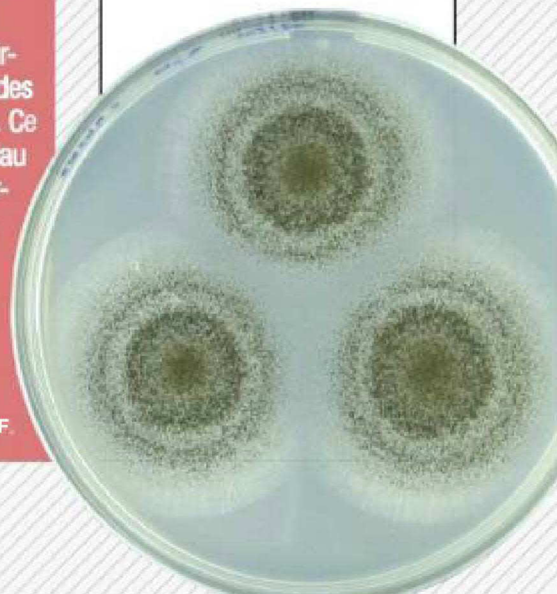
ISOLANT ET RÉCEPTEUR

Des chercheurs suisses ont fabriqué un verre, très bon isolant thermique, qui ne bloque pas la circulation des ondes des téléphones. Ce nouveau matériau nanogravé pourrait équiper les fenêtres des trains pour faciliter les communications pendant le trajet. **S.F.**

ÉNERGIE

De simples champignons recycleraient des batteries

Comment recycler les batteries lithium-ion, si répandues aujourd'hui ? Une équipe de chercheurs de l'université de Floride du Sud pense avoir trouvé une solution originale. Après avoir pulvérisé la cathode d'une batterie, contenant un mélange de cobalt et d'ions lithium, ils ont exposé le métal restant à trois souches différentes de champignons : *Aspergillus niger* (photo ci-dessous), *Penicillium simplicissimum* et *Penicillium chrysogenum*. Ceux-ci produisent naturellement de l'acide citrique et de l'acide oxalique qui, réagissant avec le métal, séparent le lithium du cobalt. Jusqu'à 85 % du lithium et 50 % du cobalt initial ont ainsi été extraits par ce processus. Reste à trouver comment les isoler du milieu acide dans lequel ils sont plongés. **S.D.**



MÉDICAMENT GÉNÉRIQUE : IL A 20 ANS DE SERVICE DERRIÈRE LUI



Le médicament générique existe depuis 1996 et permet de traiter les maladies bénignes comme les maladies les plus graves.

Rendez-vous sur medicaments.gouv.fr

DEVENIR GÉNÉRIQUE ÇA SE MÉRITE

L'Assurance Maladie

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DES AFFAIRES SOCIALES ET DE LA SANTÉ

ansm

Sauvegardez vos DVD et VHS en HD !

Branchez le boitier de votre convertisseur compact sur votre magnétoscope, caméscope ou votre lecteur DVD et convertissez toutes vos vidéos (DVD, VHS, Hi8) en HD facilement et rapidement. Équipé d'un écran LCD de 6 cm, vous pouvez contrôler les vidéos en cours de numérisation mais aussi sélectionner et/ou couper certaines images. Sa carte SD vous permet de lire et d'enregistrer vos vidéos sur d'autres supports (ordinateur, tablette…) pour les conserver.



PAIEMENT 3X SANS FRAIS

Sans ordinateur ! Adaptateur et câbles fournis



129 €

LIVRAISON RAPIDE **COLISSIMO OFFERTE**

Convertisseur vidéo numérique

Dim. 10,5 x 7 x 2,4 cm. Fabrication ABS antichoc. Livré avec carte mémoire 4 Go, adaptateur secteur USB AV, câble USB, câble AV, câble CVBS. Format d'enregistrement AVI. Garantie 1 an. Éco-participation incluse.

Cuir véritable et surpiqûres orange





Originalité et sobriété

Montre chronographe Spirit of St Louis - 49 €

Boitier rond en alliage chromé finition brillante. Étanche poussière et ruissellement de l'eau. Diamètre boitier : 42 mm. Verre minéral plat avec film protecteur. Lunette intérieure argentée. 2 boutons poussoirs chrono. Mouvement chrono chinois CH-31 avec dateur. Cadran bleu marine. Bracelet rembourré en cuir véritable. Garantie : 1 ans. Éco-participation incluse.

Construisez une voiture à air comprimé !

Simple et ludique, ce kit de montage vous permet de réaliser une voiture fonctionnant à l'air comprimé, l'énergie gratuite par excellence et non polluante ! Actionnez ensuite sa pompe à air. Votre voiture se met à rouler à la vitesse de 15 km/h sur une distance de 50 mètres.

Kit de construction voiture à air comprimé

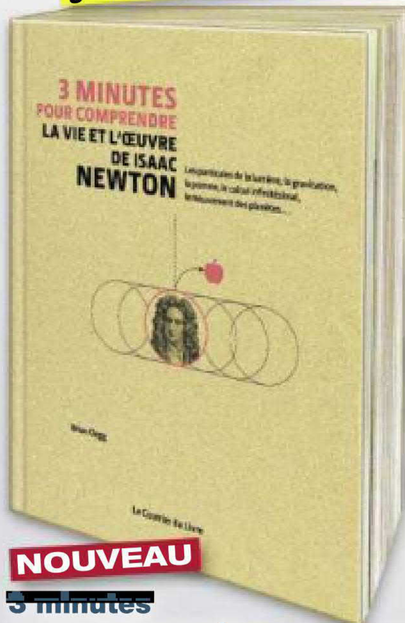
Environ 100 pièces à monter. Matière plastique et métal.

LE KIT DE CONSTRUCTION **29,90 €** seulement



SUR LES TRACES DE NEWTON

Composition de la lumière blanche, mécanique classique, gravitation universelle…



NOUVEAU

OFFRE SPÉCIALE « NEWTON »

LIVRE + PENDULE **34,10 €** au lieu de ~~37,90 €~~

RÉDUCTION SPÉCIALE **-10%**

Isaac Newton, sa vie, ses théories, ses concepts

Physicien, mathématicien, astronome, alchimiste, parlementaire et maître de la monnaie royale, que connaissez-vous de ce théologien qui figure parmi les plus grands génies de tous les temps ?

~~3 minutes~~ pour comprendre la vie et l'œuvre d'Isaac Newton - 18 €

Auteur : Brian Clegg. Dim. 19 x 24 cm. 162 pages. Éditions Le Courrier du livre.

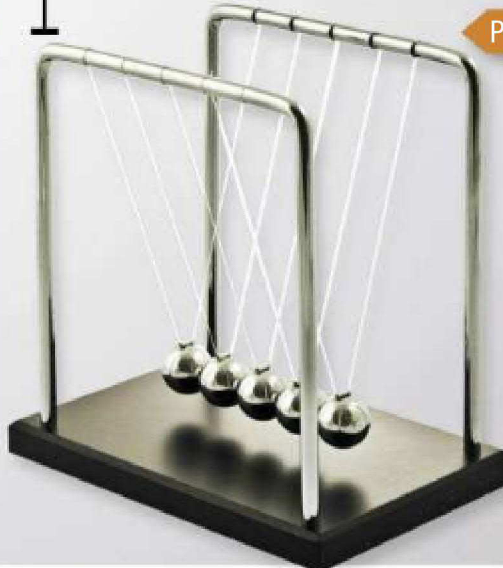
Un classique scientifique à offrir

Vous le savez sans doute, ce pendule de Newton illustre les théories de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie. Et en plus, avec son socle en bois et ses billes de gros diamètre, c'est un bel objet de décoration

Pendule de Newton Deluxe - 19,90 €

Dim. 18 x 17,5 x 12 cm. Socle noir en bois. Métal argenté. Bille diam. 1,8 cm.

PENSEZ-Y !



Visuels non contractuels

La Boutique SCIENCE & VIE

Chaque mois, La Boutique *Science & Vie* sélectionne pour vous des livres, idées cadeaux et des objets scientifiques ou insolites.

99 € seulement !

OU **3 x 33 €**

PAIEMENT 3 x SANS FRAIS

LIVRAISON RAPIDE **COLISSIMO OFFERTE**

Le charme d'un tourne disques rétro !

Ecoutez tous vos vinyles où que vous soyez grâce à ce magnifique tourne disques « valise ». Conservez informatiquement tous vos tubes préférés avec son encodeur audio ou profitez des deux enceintes intégrées pour écouter vos mélodies.

Valise tourne disques MUSE

Tourne-disques stéréo 3 vitesse 33 / 45 / 78 tours. Dimensions : 257 mm (H) x 118 mm (P) x 352 mm (L). Poids net : 2,7 kg. Port USB pour la lecture et l'encodage. Arrêt automatique. Adaptateur de disque 45 tours. Valise finitions cuir grainé. Prise sortie RCA. Prise entrée auxiliaire (3,5 mm). 2 enceintes intégrées. Alimentation : AC : 100 - 240 V, 50 / 60 Hz. Accessoires : Adaptateur secteur, Stylus de remplacement. Garantie 1 an. Éco participation incluse.



Protégez et rangez vos magazines !

La reliure *Science & Vie* - 15 €

Couverture toîlée.
Contient 12 numéros.





Pensez au kit de nettoyage ! - 16,90 €

Chiffon, liquide de nettoyage, brosse douce en fibre de carbone.

POUR COMMANDER ET S'INFORMER

www.laboutiquescienceetvie.com
Exclusivité Internet : Livraison en Points Relais®, PayPal®

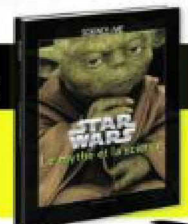
Renvoyez le bon de commande avec votre règlement à
La Boutique SCIENCE & VIE - CS 90125 - 27 091 ÉVREUX CEDEX 9

01 46 48 48 83 (6 jours/7 paiement CB uniquement)

EN CADEAU avec votre commande dès 49 €

Le livre ***« Star Wars, le mythe et la science »*** **de Science & Vie**

Découvrez jusqu'où la science rejoint la fiction, grâce à votre saga préférée !



BON DE COMMANDE

À RENVOYER DANS UNE ENVELOPPE AFFRANCHIE AVEC VOTRE RÈGLEMENT À : LA BOUTIQUE SCIENCE & VIE - CS 90125 - 27 091 ÉVREUX CEDEX 9

Articles	Réf.	Quantité	Prix	Sous-total
Convertisseur vidéo numérique	395.335	x	129 €	= €
Montre Spirit of St Louis	400.184	x	49 €	= €
Kit Voiture à air comprimé	388.108	x	29,90 €	= €
Livre « 3 min. pour comprendre... Isaac Newton »	403.436	x	18 €	= €
Pendule de Newton Deluxe	365.189	x	19,90 €	= €
Offre spéciale « Newton »	403.824	x	34,10 € au lieu de ~~37,90 €~~	= €
Valise tourne disques MUSE	397.612	x	99 €	= €
Kit de nettoyage pour disques	373.720	x	16,90 €	= €
Reliure *Science & Vie*	353.458	x	15 €	= €
			SOUS-TOTAL	€
Avec ma commande dès **49 €**, je reçois en **CADEAU** le livre **STAR WARS**				**OFFERT**
FRAIS D'ENVOI (cocher la case de votre choix)	☐ Envoi normal			**6,90 €**
	☐ **Ma commande atteint 49 €** Envoi Coliéco			**GRATUIT**
Frais d'envoi offerts dès 49 € de commande !	☐ Livraison rapide Colissimo			**7,90 €**
	☐ **Ma commande atteint 75 € Livraison rapide Colissimo**			**GRATUIT**
			TOTAL	**€**

> Mes coordonnées

CODE AVANTAGE : 383.299

☐ M. ☐ Mme ☐ Mlle

Nom ______________ Prénom ______________

Adresse ______________

Complément d'adresse (résidence, lieu-dit, bâtiment) ______________

CP ☐☐☐☐☐ Ville ______________

Tél. ______________
Grâce à votre N° de téléphone (portable) nous pourrons vous contacter si besoin pour le suivi de votre commande.

E-mail ______________

☐ Je souhaite bénéficier des offres promotionnelles des partenaires de *Science & Vie* (groupe Mondadori)

> Mode de paiement

☐ **Je règle par chèque** bancaire ou postal à l'ordre de SCIENCE & VIE
- ☐ en **1 fois** la totalité de ma commande
- ☐ en **3 fois sans frais** (à partir de 99 € d'achat)

☐ **Je règle par carte bancaire**
- ☐ en **1 fois** la totalité de ma commande
- ☐ en **3 fois sans frais** (à partir de 99 € d'achat)

PAIEMENT 3 x SANS FRAIS

Carte bancaire N° ☐☐☐☐ ☐☐☐☐ ☐☐☐☐ ☐☐☐☐

Expire fin : ☐☐ / ☐☐

Cryptogramme ☐☐☐
Les 3 chiffres au dos de votre CB

Date et signature obligatoires

Offre valable uniquement en France métropolitaine pendant deux mois dans la limite des stocks disponibles. Délai de livraison des produits : maximum 2 semaines après l'enregistrement de votre commande sauf si envoi par Colissimo (5 jours max.). Selon l'article L121-21 du code de la consommation, vous disposez d'un délai de 14 jours pour changer d'avis et nous retourner votre colis dans son emballage d'origine complet. Le droit de retour ne peut être exercé pour les enregistrements vidéo descellés. Les frais d'envoi et de retour sont à votre charge. En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-contre sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès de Mondadori. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. Cochez la case si refus ☐.

MONDADORI MAGAZINES FRANCE SAS - RCS 452 791 262 NANTERRE - CAPITAL : 60 557 458 €

OPÉRATIONS CHIRURGICALES
IL Y A VRAIMENT DE L'ABUS !

Le chiffre donne le vertige : dans 20 % des cas, un patient serait opéré en France alors que l'intervention ne s'impose pas ! Au-delà des risques, notamment nosocomiaux, comment en est-on arrivé là ? Cancer, hernie… **Héloïse Rambert** a identifié cinq grands abus.

C'est bien connu : les Français sont les champions toutes catégories de la consommation de médicaments. Ce qui est moins connu, c'est que dans nos hôpitaux, qu'ils soient publics ou privés, nous passons aussi trop souvent sous le bistouri.

Car oui, il est possible de se retrouver sur une table d'opération, avec tous les risques que cela comporte… sans que la science ne le justifie vraiment.

Oui, on peut se faire opérer d'une appendicite sans que ce soit nécessaire. Ou de la prostate. D'une hernie discale. D'un cancer de la thyroïde.

Et oui, il faut le savoir : la décision de vous faire passer sur le billard – une décision tout sauf anodine – n'est pas toujours prise dans votre seul intérêt.

Evidemment, le plus souvent, le médecin fait ce qu'il croit être le mieux pour le patient. Sauf qu'inévitablement, au-delà d'un certain point, les risques augmentent trop par rapport aux bénéfices : le malade commence à perdre du temps et de l'argent, il se fatigue, il risque de contracter des infections nosocomiales, de ressentir des douleurs ou de subir d'autres effets délétères associés à un soin sans en avoir retiré le moindre avantage.

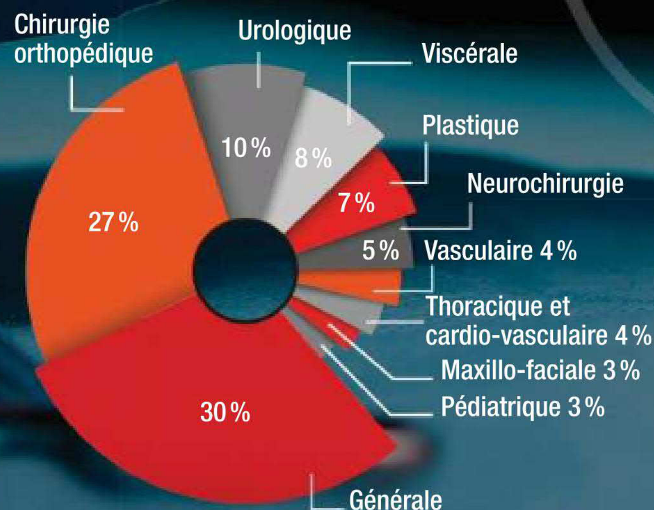
"Le surtraitement, c'est tout ce qu'il y a au-delà de ce point de rupture", →

11,8 MILLIONS D'ACTES CHIRURGICAUX…

C'est le nombre d'interventions réalisées en France en 2014, hors chirurgie dentaire, dont 60 % en structure privée. Elles ont été menées par près de 11 000 chirurgiens (le graphique ci-contre représente la répartition de leurs effectifs par spécialité).

SOURCE : CNAMTS, 2016

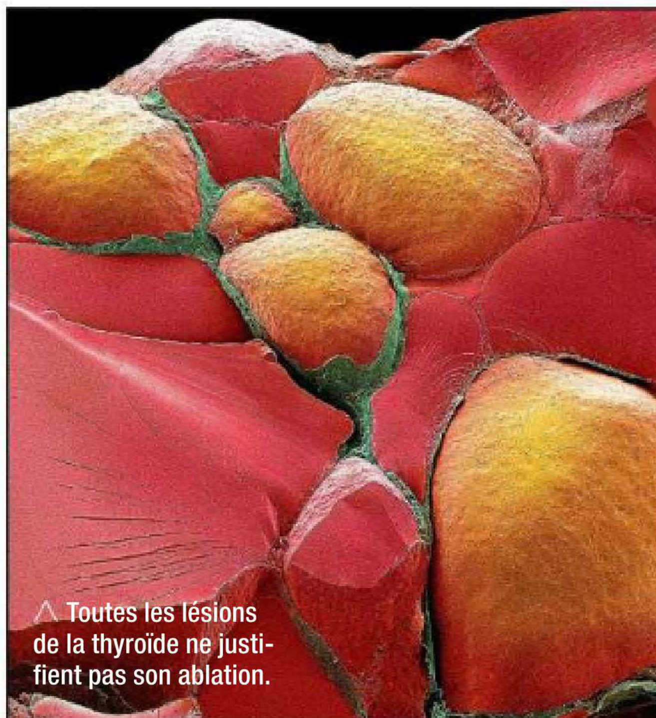
… RÉPARTIS EN 10 SPÉCIALITÉS



20% d'abus

Un acte médical sur cinq ne serait pas justifié, selon un sondage réalisé en 2012 par la Fédération hospitalière de France auprès de 803 médecins. Un chiffre très variable selon les spécialités, mais dont l'ordre de grandeur est corroboré par notre enquête.

SHUTTERSTOCK - M.KONTENTE


△ Toutes les lésions de la thyroïde ne justifient pas son ablation.

Des abus par dépistage excessif

LE CAS DU CANCER DE LA THYROÏDE

Les progrès spectaculaires en matière d'imagerie ont permis d'améliorer toujours plus le dépistage de certains cancers. L'imagerie "voit tout", y compris des lésions si précoces qu'elles n'auraient jamais eu le temps de nuire au patient – c'est ce qu'on appelle le surdiagnostic.

Le cancer de la thyroïde est ici un cas d'école. Il en existe quatre types, parmi lesquels les cancers dits papillaires : ce sont eux qui ont le plus de chances de ne pas dégénérer. Or, *"ce sont précisément ces petits cancers papillaires de moins de 2 cm que le dépistage repère le plus"*, remarque Juan Brito Campana, endocrinologue à la clinique Mayo (Etats-Unis). Il précise : *"Grâce aux ultrasons de haute résolution, nous pouvons maintenant détecter des nodules*

Dans **70 à 80 % des cas**, il s'agit en fait d'un surdiagnostic

→ explique le sociologue de la santé Nicolas Belorgey (CNRS). Surtraiter, c'est donc traiter trop, alors que s'abstenir ou envisager des alternatives aurait été tout aussi – voire plus – bénéfique pour le patient. Et force est de constater qu'en France, la proportion de ces gestes exploratoires et opératoires qualifiés de "non pertinents" est loin d'être marginale.

Cette question est apparue pour la première fois dans le débat public à la fin des années 1970. *"La croissance s'est ralentie et les cotisations sociales ont baissé. Pour des raisons économiques, les pouvoirs publics ont commencé à parler de surtraitement, inquiets de voir des dépenses de santé devenir très importantes et soucieux d'en trouver les causes*, raconte le chercheur. *Ils se sont demandé si les médecins ne pratiquaient pas trop de soins. C'est un très vieux problème qui a donné lieu à beaucoup d'affrontements politiques."*

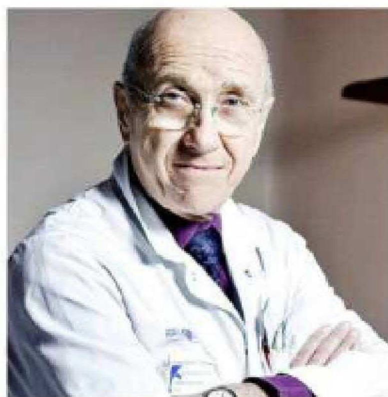
Difficile de quantifier précisément le phénomène. En France, aucun chiffre officiel n'existe. Mais en 2012, une vaste étude menée par l'Institut américain de médecine concluait sur ce chiffre impressionnant : aux Etats-Unis, 30 % des actes médicaux correspondraient à une surconsommation de soins, au sens large.

Or, tout porte à croire qu'en France, pays au niveau économique comparable, l'ampleur du phénomène soit du même ordre. C'est d'ailleurs ce que confirme un sondage réalisé en 2012 par la Fédération hospitalière de France auprès de 803 médecins (hospitaliers et libéraux), qui estiment eux-mêmes la proportion d'actes injustifiés à plus de 20 %.

DISPARITÉS INEXPLICABLES

Une autre manière d'approcher le phénomène est d'observer les différences de fréquence de certains actes sur l'ensemble du territoire. A cet égard, les chiffres de la Sécurité sociale, qui mettent en lumière des disparités inexplicables entre certains hôpitaux et cliniques, ont de quoi interloquer.

"Il y a d'énormes écarts, de l'ordre de 1 à 4 pour certains actes, alors que les populations concernées sont comparables : même âge et même





ANDRÉ **GRIMALDI**
Diabétologue à la Pitié-Salpêtrière (Paris)

Il y a d'énormes écarts entre les établissements, de l'ordre de 1 à 4 pour certains actes

thyroïdiens de 2 mm de diamètre".

En France, comme dans d'autres pays riches, l'OMS estime que 70 à 80 % des diagnostics de cancer de la thyroïde sont des surdiagnostics !

Des hormones à vie

Et surdiagnostic va de pair avec surtraitement. *"Dans la majorité des pays, la norme est l'acte chirurgical pour tout type de cancer de la thyroïde, quelles que soient la taille ou les caractéristiques histologiques* [la structure] *des lésions"*, poursuit le médecin. La surveillance active par échographie n'est proposée qu'à moins de 1 % de la population mondiale.

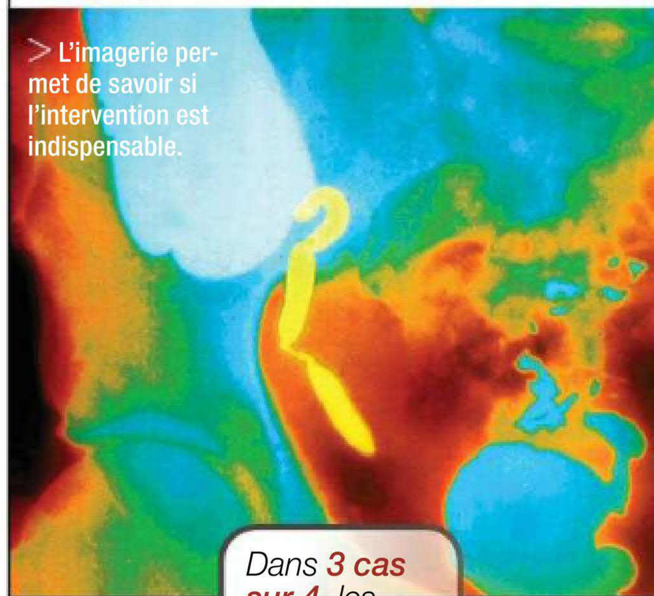
La France ne fait pas exception : selon la Haute Autorité de santé, l'intervention chirurgicale est le premier traitement du cancer de la thyroïde. Les médecins français "jouent la prudence" comme les autres, même si l'ablation de la thyroïde n'est pas anodine : le patient devra prendre des hormones thyroïdiennes à vie…

Des abus par ignorance

LE CAS DE L'APPENDICITE

L'inflammation de l'appendice est très courante. Pourtant, *"des médecins continuent de penser qu'il s'agit d'une urgence chirurgicale, alors que dans un certain nombre de cas, une antibiothérapie suffit*, constate André Grimaldi. *On peut aujourd'hui voir grâce à l'imagerie s'il est nécessaire, ou non, de passer au bloc."*

En comparant l'utilité du recours à la chirurgie en cas d'appendicite à celle de la simple administration d'antibiotiques, une étude parue en 2015 dans le *British Journal of Surgery* a souligné l'intérêt qu'il y a à attendre avant d'opérer : 73 % des personnes traitées par antibiotiques ont pu éviter le billard et toutes ses éventuelles complications, tandis que les 27 % qui ont tout de même dû se faire opérer n'ont pas pâti d'avoir attendu.



> L'imagerie permet de savoir si l'intervention est indispensable.

morbidité, souligne André Grimaldi, diabétologue à la Pitié-Salpêtrière (Paris), qui dénonce depuis longtemps les dérives des établissements de santé. *C'est le cas d'interventions comme les césariennes, les poses de stent, les ablations de l'utérus ou de la thyroïde, ou encore les opérations du canal carpien. Dans certains cas, les chiffres explosent : on passe à un rapport de 1 à 10 ! Ce qui laisse penser que certains praticiens surtraitent, mais aussi, très certainement, que d'autres sous-traitent…"* Un sous-traitement d'ailleurs tout aussi difficile à estimer.

Pour le patient, c'est un casse-tête. *"Difficile de prouver après coup que l'intervention n'était pas utile*, témoigne Claude Rambaud, qui, à l'association Le Lien, aide les victimes d'accidents médicaux à obtenir une indemnisation. *Mais quand il y a eu un problème, il arrive qu'un expert reconnaisse qu'il n'aurait pas fallu opérer. Comme dans le cas d'opérations du dos, qui peuvent causer des dégâts."*

Ce sont les hernies discales qui constituent d'ailleurs le gros des dossiers au Lien. *"Il est possible, à la suite d'une intervention de ce type, de ressentir des douleurs aggravées*, déplore Claude Rambaud. *Cela peut même conduire à une perte d'autonomie totale."* De quoi y réfléchir à deux fois avant de passer sur le billard.

Pourquoi autant d'interventions médicales injustifiées ? La réponse, on s'en doute, n'est pas simple.

Il y a certainement d'abord une forme d'ignorance. Les médecins peinent parfois à suivre l'avancée des connaissances médicales, lesquelles s'appuient de plus en plus sur une "médecine basée sur les preuves", visant à rationaliser les actes et à homogénéiser les pratiques. Certes, comme le souligne André Grimaldi, *"la médecine n'est pas une science exacte, mais un artisanat, avec une disparité des pratiques qui ne pourra jamais disparaître complètement. Il s'agit d'individualiser le traitement en prenant en compte l'âge, l'évolutivité de la maladie, les réponses variables au traitement, les effets secondaires, les choix du patient et tous les facteurs susceptibles d'évoluer".*

> Dans **3 cas sur 4**, les antibiotiques suffisent

Reste que certains médecins en font souvent trop, convaincus d'agir dans le meilleur intérêt du patient au vu des informations dont ils disposent, alors

SPL/COSMOS - LEA CRESPI/PASCO - BSIP

qu'ils ignorent les nouvelles recommandations ou qu'ils doutent de leur pertinence. L'opération de l'appendicite en est un cas emblématique (lire l'encadré p. 43).

Autre facteur : les progrès de la médecine. L'allégement considérable des techniques chirurgicales (moins longues et moins invasives) facilite l'acceptation de l'opération. *"Quand, en 1920, un malade sur trois ne sortait pas vivant de la salle d'opération, les chirurgiens y réfléchissaient forcément à deux fois avant d'opérer ! Depuis que la chirurgie de la prostate, par exemple, est devenue moins agressive, le nombre d'interventions a augmenté"*, admet le chirurgien urologue Guy Vallancien.

UNE QUESTION DE BUDGET

Le surtraitement est aussi encouragé par les progrès de l'imagerie médicale. Parce que quand on cherche, le plus souvent, on trouve ! Même des choses qui n'auraient peut-être jamais causé le moindre préjudice au patient. Le cas d'école, ici, c'est le cancer de la thyroïde (lire l'encadré p. 42).

André Grimaldi prend l'exemple de l'électrocardiogramme d'effort : *"Si l'on pratique un examen de routine sans qu'il soit forcément nécessaire, il est très probable que l'on trouve de petites anomalies, alors que celles-ci ne sont pas des marqueurs pertinents pour juger de la nécessité d'intervenir. Le danger, c'est que la machine peut s'emballer. Peut suivre une coronarographie, qui est un examen dangereux, ou pis, la pose préventive d'un stent, qui transforme la personne en grand coronarien."*

Ce n'est pas tout. Intervient aussi le désir d'apporter une réponse concrète aux demandes pressantes des patients (par exemple pour une hernie discale, lire ci-contre), ou la simple commodité organisationnelle des services hospitaliers (c'est particulièrement frappant pour les césariennes, lire l'encadré p. 46).

A tous ces facteurs s'en ajoute un dernier, et pas des moindres : l'intérêt financier qu'il y a à pratiquer toujours plus d'actes médicaux.

Car au début des années 2000, décision a été prise en France de financer les hôpitaux en fonction de leur activité. Un nouveau mode de financement qui pousse les établissements de santé à facturer davantage pour garder leurs finances à l'équilibre.

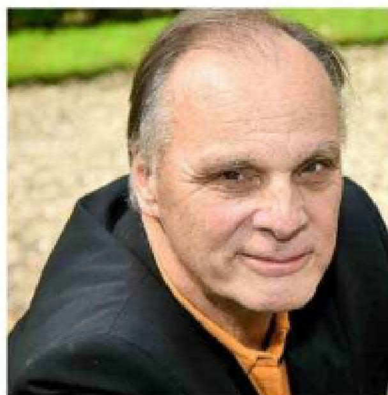
En janvier 2014, une analyse de l'Insee s'est intéressée à la première phase de la réforme (2005-2008), en se concentrant sur les actes chirurgicaux. Conclusion : la réforme a bel et bien eu un effet inflationniste sur ces derniers. Le nombre moyen de séjours "par groupe homogène de malades" a augmenté dans le public, passant de 24,3 séjours en 2005 à 26,4 séjours en 2008, alors qu'il est resté stable dans le privé – où le mode de financement n'a pas changé. Un phénomène particulièrement mis en valeur dans le cas des opérations de la prostate (lire ci-dessus).

"C'est un cercle vicieux, s'insurge André Grimaldi. *On pousse à multiplier les actes. Tant que les médecins n'ont pas l'impression de nuire aux malades, juste éventuellement aux finances publiques, ils n'y voient pas un viol éthique !"*

Ce sont surtout les actes techniques qui ont été touchés par cette "tarification à l'activité" (T2A). *"Elle les valorise parce que ce sont des actes facilement identifiables et standardisés"*, note Nicolas Belorgey. L'exemple des césariennes, qui



> 10 à 20 % des cancers de la prostate détectés précocement n'auront pas de conséquence sur la santé du patient.





GUY **VALLANCIEN**
Chirurgien et professeur d'urologie à l'université Paris-Descartes

Le système de financement des hôpitaux n'est pas vertueux : il faudrait des critères d'évaluation



Des abus par intérêt financier

LE CAS DE L'ABLATION DE LA PROSTATE

Difficile de ne pas voir derrière cette opération des causes bassement financières. Elle fait partie de ces actes dont la fréquence, qui était déjà en augmentation, a fait un bond dès 2004 avec la réforme du mode de financement des hôpitaux. Même si le taux de prostatectomies dans la population a fini par se stabiliser, avant de baisser à partir de 2007 en raison de nouvelles stratégies thérapeutiques (principalement la surveillance active), le problème de surtraitement lié aux contraintes économiques des hôpitaux persiste.

*Des opérations **4 fois plus fréquentes** dans certains départements*

D'abord, le surtraitement est toujours là : en 2013, une étude de l'Inserm estimait que 10 à 20 % des cancers de la prostate détectés à un stade précoce étaient surtraités en France. Surtout, de récents travaux ont montré que le nombre de prostatectomies varie énormément selon les départements (de 31 à 132 pour 100 000 hommes de plus de 40 ans), et est lié de manière significative à la densité de médecins urologues et au poids de l'offre de soins hospitaliers. Autrement dit, les opérations continuent de faire tourner la machine…

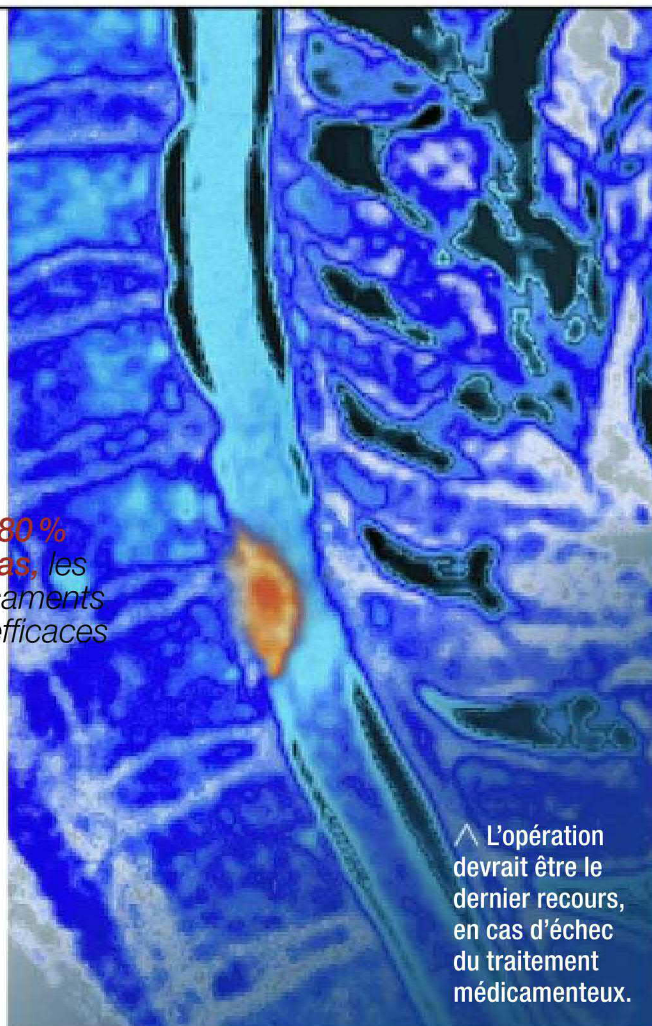
Des abus par excès de zèle

LE CAS DE LA HERNIE DISCALE

"Le cas typique de la pathologie qui expose au surtraitement chirurgical, c'est la hernie discale", souligne Christian Mazel, chef du service d'orthopédie à l'Institut mutualiste Montsouris. Face à cette pathologie très douloureuse et très courante, la chirurgie est, sur le papier, le traitement de première intention dans deux cas seulement : quand elle s'accompagne d'une sciatique paralysante ou d'une sciatique dite hyperalgique.

En dehors de ces situations, la Haute Autorité de santé recommande de commencer par un traitement médicamenteux (à base d'antalgiques, d'anti-inflammatoires, de molécules contre les douleurs neuropathiques et d'infiltrations) pendant quatre à six semaines. Et de passer ensuite, en cas d'échec, à la chirurgie. *"Dans 80 % des cas, le traitement suffit pour guérir*, assure le médecin. *Mais de nombreux chirurgiens grillent les étapes et opèrent sans attendre, ce que je juge excessif. Certes, la chirurgie est très efficace et donc tentante pour les patients, qui sont souvent encore jeunes et en demande de solutions. Il appartient au chirurgien de résister et de ne pas tomber dans l'excès."*

*Dans **80 % des cas,** les médicaments sont efficaces*



L'opération devrait être le dernier recours, en cas d'échec du traitement médicamenteux.

BSIP - D.R.

Des abus par commodité

LE CAS DE LA CÉSARIENNE

En France, une femme sur cinq accouche par césarienne, et le taux de césariennes programmées atteint 10,9 % des naissances. Or, dans 28 % des cas, cette intervention pourrait être évitée, selon une étude publiée en 2014 dans la revue en ligne *AOGS*. Même la présentation du bébé par le siège ne justifie pas à elle seule une intervention, indique la HAS. Mais par crainte d'un procès, et aussi par "commodité organisationnelle" (programmation des accouchements quand les équipes de soignants sont au complet), des césariennes sont pratiquées en excès. Elles ne sont pourtant pas sans danger. Selon l'InVS, le risque de mort maternelle est multiplié par 3,5 par rapport à l'accouchement par voie basse. Un surrisque lié aux complications de l'anesthésie, aux infections et aux thrombo-embolies.

Une opération sur 4 pourrait être évitée

sont quelquefois imposées aux patientes, est pour lui très représentatif: *"L'accouchement naturel est plus aléatoire dans son déroulement, alors que la césarienne standardise, et donc rentabilise davantage, les accouchements. Elle présente pourtant des effets indésirables importants"*, avec tous les risques induits par une opération tant pour la mère que pour l'enfant.

Autre exemple: la réanimation (utilisation de machines pour surveiller ou remplacer les fonctions vitales). *"Elle est pratiquée parfois en excès afin de percevoir une rémunération plus importante*, poursuit Nicolas Belorgey. *Les hôpitaux, qui ont de moins en moins d'argent, en viennent quelquefois à ruser pour restaurer leur budget…"*

Yves Rébufat, président du Syndicat des anesthésistes-réanimateurs, l'admet: *"Il y a des services de réanimation qui ont du mal à remplir leurs lits. On peut y avoir tendance à faire du surtraitement. D'autant que les médecins ont l'angoisse de la plainte et des poursuites judiciaires, ce qui pousse aussi dans cette direction."* Le malaise des praticiens face à la question est tangible. *"Le surtraitement n'est pas quelque chose de facile à avouer"*, lâche-t-il.

Pour Guy Vallancien, le problème vient du fait que la tarification à l'activité ne repose pas sur des critères de qualité, mais de quantité. *"C'est là que le système n'est pas vertueux. Nous devons rajouter les notions de qualité de résultat et de pertinence de l'indication. Il faudrait mettre en place très vite quelques critères d'évaluation. Et si l'on s'aperçoit que dans un hôpital trop d'actes sont inutiles, on se posera des questions !"*

UNE SITUATION UBUESQUE

Et au mode de tarification s'ajoutent d'autres critères inflationnistes. Les services doivent rentabiliser le matériel coûteux dont ils ont fait l'acquisition pour se rendre attractifs. Une situation ubuesque qui sert plus les lobbies industriels que notre santé à tous…

Les chirurgiens aussi doivent être productifs: estimant qu'ils ne savent opérer qu'à partir d'un certain nombre d'actes effectués, les pouvoirs publics imposent des seuils minimaux d'activité pour autoriser l'exercice d'une discipline en secteur hospitalier. *"Si ce seuil n'est pas atteint, l'autorisation, donnée pour cinq ans, est perdue*, précise Claude Rambaud. *Quelquefois, les médecins doivent arbitrer entre le bien-être de leurs patients et la survie de leur service. Ils ont évidemment à cœur de bien faire, mais ils sont contraints par le système."*

Il faut bien le reconnaître: même si la Haute Autorité de santé a depuis de nombreuses années un service dédié à la "pertinence des soins", la France ne fait pas partie des pays qui prennent à bras-le-corps le problème. L'assurance maladie a bien élaboré des indicateurs de ciblage des établissements qui présentent les plus forts écarts de pratique, mais seulement pour l'appendicectomie et la chirurgie du canal carpien.

Tout juste arrivé en France, le programme "Choisir avec soin", adapté de son cousin anglo-saxon "Choosing wisely", a pour objectif *"d'aider les médecins et les patients à engager un dialogue autour de la pertinence des examens et des traitements"*, explique Sandra Gomez, de la Fédération hospitalière de France. Sauf que pour l'instant, cet outil – déjà adopté par une quinzaine de pays – est uniquement testé dans les services de gériatrie en Bretagne. Surtout, *"le projet n'inclut pas encore les actes chirurgicaux"*, précise le médecin. Avant d'ajouter: *"Mais il est évident que cela va changer. La question du surtraitement en chirurgie monte en force."*

André Grimaldi abonde dans ce sens: *"Il y a urgence à ouvrir un grand chantier de santé publique, celui de la pertinence des soins. La Haute Autorité de santé devrait demander aux professionnels d'expliquer leurs différences de pratique."*

Avec un objectif simple: remettre les patients au cœur du système de santé.



EN SAVOIR PLUS

A lire : *Trop soigner rend malade*, de Claude Rambaud et Jean-Pierre Thierry (Albin Michel, 2016).

science-et-vie.com



DETLEV VAN RAVENSWAAY/SPL/COSMOS

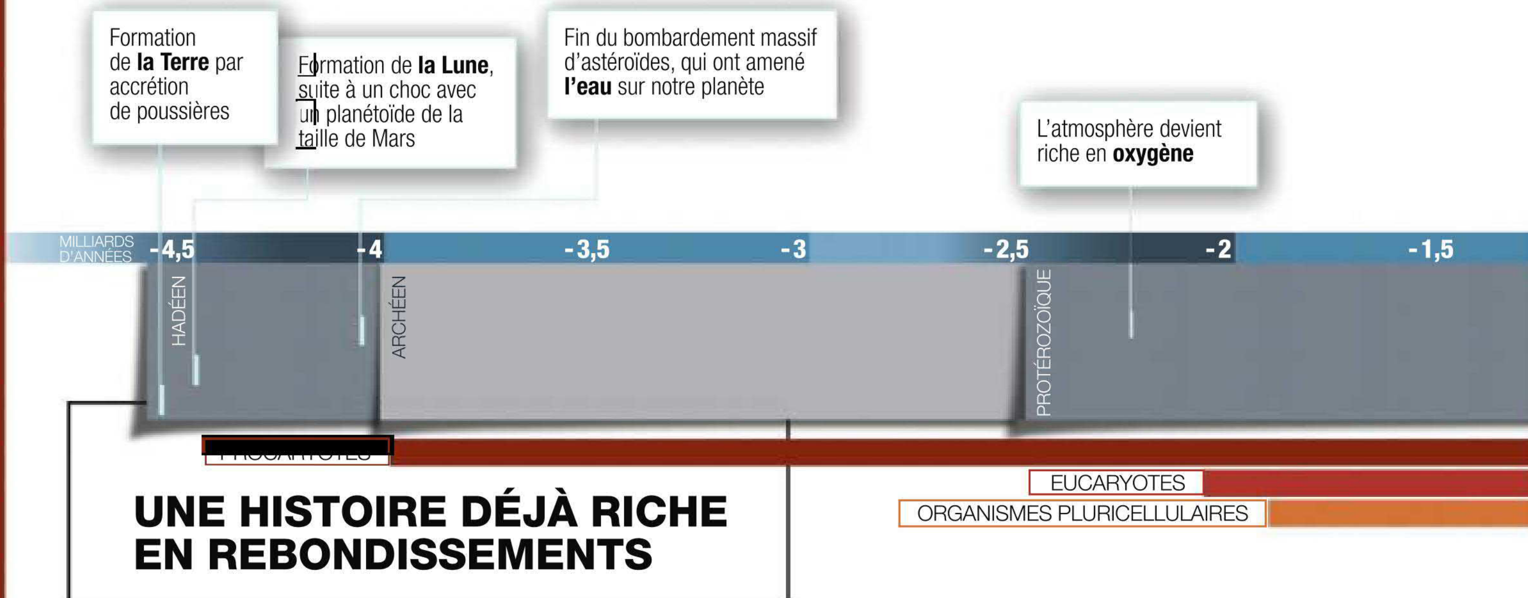
DANS 10 MILLIONS… 10 MILLIARDS D'ANNÉES…

DEMAIN LA TERRE

À LA UNE

Depuis que la découverte de planètes extrasolaires a lancé la quête de mondes semblables au nôtre, jamais la Terre, son histoire et son évolution, n'ont été étudiés d'aussi près. Au point que son destin sur le très long terme peut enfin être écrit avec une précision inégalée. Etape par étape, un nouveau scénario décrit les métamorphoses géologiques et atmosphériques qui attendent aussi bien notre petite planète bleue que la vie terrestre, jusqu'à ce que le Soleil finisse par tout dévorer. Un destin inéluctable, si l'homme n'y met pas son grain de sel. Mais un destin qui pourrait aussi réserver une surprise à la fin…

PAR VINCENT NOUYRIGAT ET ÉMILIE RAUSCHER, AVEC MATHILDE FONTEZ



UNE HISTOIRE DÉJÀ RICHE EN REBONDISSEMENTS

C'est une histoire dont tout le monde connaît la fin. Car chacun a appris sur les bancs de l'école, mi-amusé mi-affligé, que la Terre finirait un jour engloutie par le Soleil devenu, au terme de sa vie, une géante rouge. Une histoire morbide et apparemment sans suspense…

Pourtant, au vu des dernières études scientifiques sur le sujet, l'avenir de notre planète n'a rien d'un récit ennuyeux ou encyclopédique. Rappelons qu'elle n'en est qu'au mitan de sa vie. Agée de 4,54 milliards d'années, la Terre est en effet amenée à évoluer pendant encore plus de 5 milliards d'années ! Une échelle de temps vertigineuse qui se prête à de spectaculaires transformations et à de multiples rebondissements. Songez qu'il y a environ 700 millions d'années, le globe était entièrement gelé (eaux équatoriales comprises) ; qu'il y a 300 millions d'années, les continents étaient tous accolés, formant la Pangée ; et qu'il y a 50 millions d'années, l'Antarctique était recouvert de forêts luxuriantes – une Terre aux allures… extraterrestres.

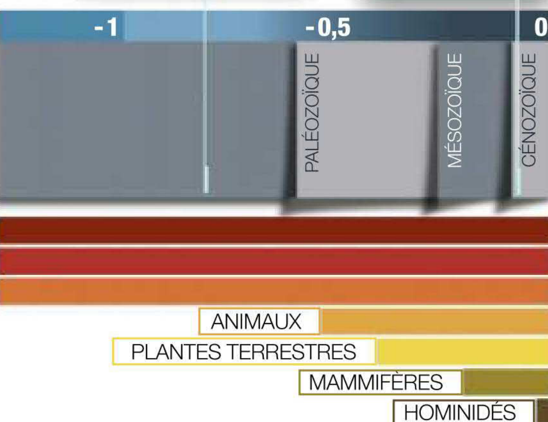
Alors, à quoi ressemblera la Terre dans 1 million, 100 millions, 1 milliard ou 10 milliards d'années ? Un monstrueux astéroïde aura-t-il changé la face du monde ? De nouvelles chaînes de montagnes se seront-elles élevées ? L'océan Atlantique sera-t-il toujours là ? L'atmosphère sera-t-elle encore respirable ? Le soleil brillera-t-il du même éclat ? Notre planète tournera-t-elle rond ? Y aura-t-il encore une vie terrestre, à la surface ou en profondeur ? Autant de questions futuristes auxquelles tentent de répondre géologues, climatologues et biologistes (voir pages suivantes).

> JACK **O'MALLEY-JAMES**
> Astrobiologiste, université Cornell (Etats-Unis)
>
> *Anticiper le type de vie qui pourrait exister sur les versions futures de la Terre permet de mieux définir les signatures à rechercher sur certaines exoplanètes*

Simuler ainsi le destin de la Terre peut sembler un jeu de l'esprit gratuit, ou une façon de se faire peur à peu de frais. D'autant que personne ne pourra jamais vérifier les résultats de ces modélisations – l'Homme aura probablement disparu bien avant que ces événements ne surviennent.

Pour autant, cette démarche n'est pas inutile. Elle est même déjà largement employée par les spécialistes des exoplanètes dans leur quête d'une vie extraterrestre : *"Nous découvrons de plus en plus de planètes de type terrestre habitable, et certaines pourraient être beaucoup plus vieilles que notre Terre,* explique Jack O'Malley-James, astrobiologiste à l'université Cornell. *Anticiper le type de vie qui pourrait exister sur des versions futures de la Terre nous permet de mieux définir les signatures à rechercher sur ces exoplanètes en 'fin d'habitabilité'." "Ces recherches devraient permettre de situer plus précisément la limite d'habitabilité autour d'une étoile"*, complète Jérémy Leconte, du Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux.

Ces études sur l'évolution à venir de la Terre ne manquent pas non plus de vertus : comme replacer nos vies humaines fugaces à leurs justes proportions temporelles ; ou nous faire enfin réaliser à quoi pourrait ressembler la fin du monde, la vraie, évaluée scientifiquement, loin des apocalypses annoncées à tort et à travers par les gourous et autres complotistes – ici, rien de surnaturel, aucune "punition", le



simple cours des choses, plutôt fascinant quand on prend la peine de s'y intéresser.

Même si, inutile de le cacher, ces projections à très long terme ont parfois des marges d'erreur importantes.

De nombreux mécanismes biogéochimiques restent incompris, et les données issues du passé terrestre peuvent être très parcellaires. Tandis que les phénomènes chaotiques régissant, par exemple, les trajectoires des planètes du système solaire ou les turbulences du manteau terrestre ne permettent pas de prévisions sûres au-delà de quelques dizaines de millions d'années. Les débats sont donc souvent vifs. Et certains résultats tout récents pourraient mener à des scénarios totalement inattendus: *"Nous avons détecté une tendance à l'amincissement de la croûte terrestre, si bien que notre planète pourrait être presque entièrement couverte d'océans dans 1 milliard d'années"*, signale par exemple Bruno Dhuime, géochimiste à l'université de Bristol. Sans oublier l'influence de l'humanité, devenue ces dernières décennies une nouvelle force géologique (lire ci-contre).

Et qui sait? Il se pourrait même que la fin de l'histoire nous réserve de bonnes surprises... **V.N.**

Le facteur X: quel impact de l'homme sur le destin de la Terre?

Par sa puissance de construction et de destruction, l'humanité est devenue une force géologique à part entière. Même si les scientifiques ne s'accordent pas tous sur le terme "anthropocène" – l'ère de l'Homme –, il ne fait aucun doute que les agissements de notre espèce laisseront pour longtemps une marque singulière dans le sol terrestre: aluminium, béton, plastiques, isotopes issus d'essais nucléaires... Au-delà de ces indices stratigraphiques, notre civilisation pourrait aussi influencer l'évolution de la Terre sur le long terme. Difficile de deviner si l'espérance de vie d'*Homo sapiens* dépassera celle normalement dévolue aux mammifères (environ 2,5 millions d'années), ou même d'imaginer comment évolueront nos capacités de nuisance. Il n'empêche: ces dernières décennies de développement débridé suffisent à affoler les rythmes naturels.

A commencer par l'impact sur le climat du CO_2, dont environ 20% des molécules émises aujourd'hui persisteront dans l'atmosphère plus de 10000 ans. *"La vitesse et les quantités d'émissions actuelles sont inédites, un vrai feu d'artifice!"*, rappelle Gilles Ramstein, du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement. Depuis le début de l'âge industriel, nous avons introduit dans l'atmosphère quelque 2000 milliards de tonnes de CO_2, augmentant sa teneur de 40%. *"A ces niveaux, une glaciation devient impossible. Et les rejets attendus dans le siècle à venir devraient décaler d'au moins 50000 ans le prochain âge glaciaire"*, a calculé Andrey Ganopolski (Institut Potsdam). Or, ces épisodes ont un réel impact sur les paysages, dessinant des vallées, creusant des lacs, charriant des sols fertiles. A vrai dire, ajoute le climatologue, *"la géo-ingénierie nous permettrait, en principe, de repousser à l'infini une glaciation... ou d'en déclencher une"*.

S'éloigner du Soleil

Autre phénomène humain aux conséquences lourdes, la chute de la biodiversité. Car les indices d'une extinction de masse s'accumulent: une étude parue en 2015 dans *Science Advances* fait état d'un taux de disparition des vertébrés 114 fois supérieur au rythme naturel. Certains biologistes prévoient que les espèces de petite taille, adaptatives et à reproduction rapide pourraient sortir gagnantes. Pour voir peut-être émerger dans quelques millions d'années un monde de rats, de cafards et de mauvaises herbes.

Climat, géologie, biosphère. Notre influence est patente. Inversement, pourrait-elle aller jusqu'à sauver la Terre d'une destruction annoncée? Ce n'est pas totalement exclu. Ainsi, en 2001, trois astrophysiciens avaient proposé d'éloigner progressivement la Terre du Soleil, pour échapper à sa luminosité croissante et à sa transformation en géante rouge. Leur idée: utiliser les effets gravitationnels d'un astéroïde massif placé volontairement sur une orbite *ad hoc*, qui passerait tous les 6000 ans à proximité de notre planète. Plutôt malin... Mais peut-on échapper indéfiniment à son destin? **V.N.**

De 0 à 100 millions d'années

LE TEMPS DES GRANDES CATASTROPHES

La vie sur Terre n'a jamais été un long fleuve tranquille ; ces 500 derniers millions d'années, les paléontologues ont ainsi repéré pas moins de cinq extinctions massives pendant lesquelles jusqu'à 90 % des espèces ont pu disparaître. Et il n'y a pas de raison que cette violence cesse… A moins d'une intervention humaine démesurée (voir encadré p. 51). Au menu des 100 millions d'années à venir ? Les analyses géochimiques menées depuis une décennie laissent imaginer une série de catastrophes naturelles, parfois assez surprenantes.

Le premier choc pourrait être glaciaire. *"Les cycles de glaciation sont calés sur les variations de l'insolation reçue en été dans l'hémisphère Nord, dues à l'évolution des paramètres orbitaux, ainsi que sur la teneur en CO_2 de l'atmosphère"*, indique Andrey Ganopolski, climatologue à l'Institut Potsdam. Ces coups de froid se produisent normalement tous les 100 000 ans. Un spectacle glaçant : d'épais glaciers polaires ou alpins foncent vers le sud, écrasant tout sur leur passage et faisant reculer les forêts de 500 m par an. En Europe, lors du dernier maximum glaciaire, plus un seul feuillu ne subsistait au nord de la latitude de Clermont-Ferrand. Seuls quelques restes de forêts boréales ont été repérés dans des régions au microclimat miraculeux, comme les Carpates. *"La plupart des espèces ont tout de même le temps de migrer vers le sud et de s'adapter"*, tient à relativiser Andrey Ganopolski. Quant à l'homme, il ne sera sans doute plus là pour assister à cette débâcle…

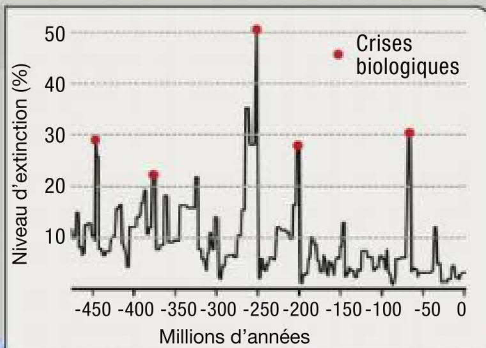
LE VRAI DANGER SERA COSMIQUE

Il n'y a pas que les glaciers. Certains volcans promettent bien pire. *"On observe que les superéruptions éjectant plus de 600 km³ de matière* [contre 13 km³ pour le Krakatoa en 1883] *se produisent à peu près tous les 100 000 ans"*, avertit Ilya Bindeman, géologue à l'université de l'Oregon. A l'image du volcan indonésien Toba qui, il y a 74 000 ans, avait éjecté ses aérosols soufrés dans la stratosphère, entravant plusieurs années le rayonnement solaire. L'apocalypse ? *"Une superéruption annihile et enterre toute vie à des centaines de kilomètres alentour, mais il est douteux que cela déclenche une extinction globale"*, tranche le chercheur.

Le vrai danger pour la vie, finalement, sera cosmique. Avec, d'abord, un grand classique, qui nous est statistiquement réservé tous les 100 millions d'années : la chute d'un astéroïde ou d'une comète d'une dizaine de kilomètres de diamètre. Une telle collision, libérant une énergie équivalente à un milliard de fois la bombe d'Hiroshima, embrase l'atmosphère à plus de 1 000 °C, déclenche des mégatsunamis de plusieurs centaines de mètres de hauteur et des éruptions volcaniques sur toute la planète, tout en soulevant quelque 200 000 km³ de poussières qui plongent la Terre dans un "hiver d'impact" ; les températures globales chutent d'une dizaine de degrés, la photosynthèse est à la peine et les écosystèmes s'effondrent en cascade…

La Terre a déjà traversé 5 crises biologiques

Les données paléontologiques font apparaître cinq grandes extinctions de la biodiversité au cours des 500 derniers millions d'années. Ces évènements ont des origines diverses et souvent débattues : glaciations, volcanisme, astéroïdes, radiations.





Laissant la biosphère en état de choc pour plusieurs millions d'années. Selon Bill Napier, astronome à l'université de Buckingham, *"le pire scénario ne serait pourtant pas un grand impact isolé mais une succession de forts impacts liés à la désintégration d'une comète géante, une hypothèse à considérer sérieusement"*.

Autre bombardement cosmique mortel : les bouffées de radiations libérées dans notre galaxie. Si les deux ou trois supernovae relevées chaque siècle ont peu d'effets concrets, la rencontre entre deux monstres, étoiles à neutrons et trous noirs, produirait par contre de redoutables "sursauts gamma" : des flux dirigés de rayons gamma, X et ultraviolets capables d'entamer notre couche d'ozone pendant dix ans. Sans cet écran protecteur, la dose de rayons UVB mutagènes atteignant le sol serait tout simplement mortelle pour les phytoplanctons, à la base de la chaîne alimentaire océanique et responsables de la moitié de l'activité photosynthétique planétaire. *"La Terre a probablement été frappée par un ou deux sursauts gamma lors du dernier milliard d'années,* estime Brian Thomas, astrophysicien à l'université du Kansas. *Nous pensons même que ce phénomène pourrait être à l'origine de la grande extinction de l'Ordovicien il y a 450 millions d'années."*

Et pourtant, la vie continue… **V.N.**

Et la vie dans tout ça ?

Les végétaux et les animaux actuels ne feront plus partie de ces paysages : la durée de vie moyenne des mammifères étant de 2,5 millions d'années, et celle des unicellulaires marins tout au plus de 25 millions. Les espèces disparaissent ou se transforment – comme les dinosaures sont devenus des oiseaux. Difficile d'imaginer qu'il en soit autrement pour *Homo sapiens*.

ILLUSTRER.FR - M.KONTENTS

De 100 à 500 millions d'années

UN SUPERCONTINENT SE FORME

Des chaînes de montagnes aux dimensions hallucinantes, des déserts aussi grands que la Russie, des paysages qui défilent sur des dizaines de milliers de kilomètres, un océan mondial…

D'ici 250 millions d'années, les principaux continents actuels n'en formeront plus qu'un: un supercontinent, que les géologues ont déjà baptisé "Amasie". Rien de bien mystérieux pour qui connaît la tectonique des plaques: *"Les mouvements de convection au sein du manteau terrestre font régulièrement émerger ces comportements de rassemblement puis de séparation des continents"*, signale Nicolas Coltice, chercheur au Laboratoire de géologie de Lyon. Les derniers supercontinents en date furent la Pangée, il y a 300 millions d'années, et Rodinia, il y a 1,1 milliard d'années.

Des débats intenses ont actuellement lieu sur la dynamique future de nos continents – certains croient voir les signes d'une fermeture de l'Atlantique, d'autres du Pacifique. *"Nos derniers modèles suggèrent que dans 250 millions d'années, l'Eurasie, l'Afrique, l'Amérique du Nord et l'Australie seront rassemblées dans l'hémisphère Nord,* expose Masaki Yoshida, chercheur à l'Agence japonaise pour les géosciences marines et la technologie. *Seules l'Antarctique et l'Amérique du Sud resteront à peu près à leur place."*

Il faut imaginer des mers comme la Méditerranée, qui se referment et s'évaporent petit à petit; des océans qui se rétrécissent progressivement, laissant s'enfoncer à tout jamais leur plancher dans le manteau terrestre… *"Les collisions continentales feront émerger des chaînes de montagnes himalayennes extrêmement étendues: à l'époque de Rodinia, la chaîne de Grenville s'étendait du Mexique jusqu'au nord du Canada"*, raconte Philip Heron, géophysicien à l'université de Toronto.

DE MONSTRUEUX RELIEFS

Une fois formé, *"ce supercontinent bouleversera toutes les enveloppes de la Terre"*, souligne Nicolas Coltice. Régimes des vents, précipitations, transports des sédiments, courants océaniques profonds… Loin des côtes et privé de nuages par de monstrueux reliefs, l'intérieur de ses terres devrait ainsi connaître une aridité extrême.

Or, *"cette sécheresse bloque les processus géologiques permettant le pompage du CO_2 atmosphérique,* relève Yves Goddéris, du Laboratoire des mécanismes et transferts en géologie de Toulouse. *Au moment de la Pangée, l'atmosphère contenait ainsi vingt fois plus de CO_2 qu'aujourd'hui"*.

Cette nouvelle configuration géographique bouleverse aussi la biosphère. Ce continent d'un seul tenant présente en effet nettement moins de longueurs de côtes, dont les eaux peu profondes, chaudes et lumineuses, concentrent 85 % de la biomasse océanique. Dans le même temps, les obstacles à l'expansion des espèces terrestres s'effacent, entraînant une réduction de la diversité globale – seuls les effets liés à la latitude permettront encore une différenciation.

Les géologues pensent qu'un épisode supercontinental ne dure guère plus de 100 à 300 millions d'années. En effet : de grandes quantités de chaleur s'accumulant sous cette immense plaque tectonique, de violents mouvements de convection commencent à disloquer le supercontinent ; au passage, cet excès de chaleur stimule aussi une puissante activité volcanique. Après l'Amasie, de nouveaux supercontinents pourront se reformer avant d'éclater à leur tour, jusqu'à ce que la tectonique des plaques se fige avec le refroidissement du manteau terrestre.

Mais la Terre aura changé radicalement de visage bien avant… **V.N.**

ILLUSTRER.FR - M.KONTENTE

Et la vie dans tout ça ?

La formation d'un supercontinent bouleverse l'équilibre de tous les écosystèmes, faisant brutalement chuter la biodiversité. Si les chaînes alimentaires s'en trouvent chamboulées, la flore montre pourtant de fortes capacités de réorganisation et limite les dégâts. Tandis que, profitant de la crise générale, les champignons s'épanouissent, comme ce fut le cas sur la Pangée.

Les continents se regroupent dans l'hémisphère Nord

Les derniers modèles de dérive des continents prévoient l'apparition d'un nouveau supercontinent dans 250 millions d'années : l'Amérique, l'Asie, l'Australie, l'Afrique et l'Europe devraient être ainsi réunies dans l'hémisphère Nord – seul l'Antarctique fait bande à part.



SOURCE : MASAKI YOSHIDA

De 500 millions à 1 milliard d'années

L'ATMOSPHÈRE DEVIENT ASPHYXIANTE

C'est un comble si l'on pense aux problématiques actuelles, pourtant c'est sans doute le manque de CO_2 qui va précipiter la fin de la vie sur Terre telle qu'on la connaît aujourd'hui : riche, luxuriante, complexe…

A l'origine de cette catastrophe gazière, un phénomène implacable : le vieillissement du Soleil qui, à mesure qu'il puise dans ses réserves d'hydrogène, voit croître sa luminosité et sa chaleur – d'environ 1 % tous les 110 millions d'années. Ce ne sera pas la chaleur, le principal artisan du génocide planétaire car, selon les calculs réalisés en 2001 par Timothy Lenton, de la chaire des sciences des systèmes terrestres à l'université d'Exeter (R.-U.), notre biosphère devrait rester résiliente à l'augmentation de la température pendant encore 800 millions d'années.

DES RÉACTIONS EN CHAÎNE MORTELLES

Plus que la chaleur, le vrai problème viendra du CO_2 : il est en effet l'irremplaçable ressource en carbone nécessaire lors de la photosynthèse des plantes pour fabriquer de la matière organique. Or, le réchauffement solaire va peu à peu les en priver, amplifiant le lessivage et l'altération chimique des roches silicatées qui piégeront donc de plus en plus de CO_2. Si sa teneur dans l'atmosphère frôle aujourd'hui les 400 parties par million (ppm), dans 100 millions d'années ce taux aura commencé à baisser, enclenchant des réactions en chaîne littéralement mortelles.

Les premières affectées seront les plantes dites en "C3", qui ont besoin de températures clémentes et d'un seuil de 150 ppm de CO_2 pour procéder efficacement à leur photosynthèse. En l'occurrence les plantes vasculaires (plantes à fleur, légumes, conifères…) : soit près de 90 % de la biomasse végétale actuelle. Sous les 100 ppm, leur croissance chutera jusqu'à 70 %. Arbrisseaux faméliques, herbacées éparses incapables de fructifier deviendront progressivement la règle. *"Ces plantes pourraient avoir disparu d'ici 500 millions d'années"*, a calculé Jack O'Malley-James, astrobiologiste à l'université Cornell.

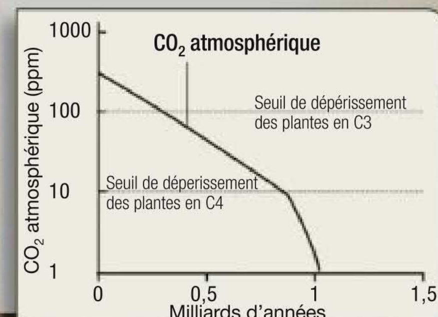
Leurs consœurs en "C4" (3 % des espèces connues : maïs, millet…) et en "CAM" (cactées…), qui disposent d'un meilleur système de captation du CO_2, résisteront jusqu'au seuil de 10 ppm, avant de se rabougrir à leur tour. La mue profonde du paysage ne s'achèvera qu'avec l'extinction de toutes les protagonistes : *"Les plantes en C4 s'éteindront dans 900 millions d'années"*, précise Jack O'Malley-James.

Fatalement, durant ces centaines de millions d'années d'agonie végétale, les hécatombes parallèles se multiplieront : *"L'extinction des plantes entraînera progressivement celle des animaux, en les privant de nourriture et parce qu'elles ne renouvelleront plus l'oxygène !"*, poursuit l'astrobiologiste, qui a esquissé la macabre chronologie de leur disparition en fonction de leurs besoins en oxygène : grands puis petits mammifères d'abord, suivis des oiseaux, des reptiles, les animaux terrestres précédant les marins dans la tombe…

Malgré de probables adaptations, souligne Jack O'Malley-James, le destin de la vie complexe est écrit : *"100 millions d'années après la fin des plantes supérieures, la vie sur Terre ne sera vraisemblablement plus que microbienne…"* **E.R.**

Le CO_2 va totalement disparaître de l'atmosphère

Les calculs sont formels : l'absorption géologique du CO_2 va s'accélérer dans 100 millions d'années sous l'effet du réchauffement solaire. Sous 100 parties par million (ppm) de CO_2 atmosphérique, les plantes vasculaires (en C3) seront les premières à disparaître.



SOURCE : KEN CALDEIRA ET JAMES F. KASTING

ILLUSTRER.FR - M.KONTENTE



Et la vie dans tout ça ?

Les plantes pourraient retarder un peu leur disparition annoncée grâce à certains types d'adaptation. Ainsi, changer de couleur les protégerait de la hausse de la luminosité. Et face à la baisse du CO_2 atmosphérique, des stratégies de nutrition pourraient se développer : passage à un régime carnivore ou symbiose avec des champignons.

De 1 à 3 milliards d'années

LA CHALEUR FAIT S'ÉVAPORER LES OCÉANS

Comme un sombre retour aux origines, dans quelque 900 millions d'années notre planète ne sera plus peuplée que de micro-organismes: bactéries, archées, eucaryotes – ces fameuses cellules à noyau, jadis chantres de la complexité. Mais le réchauffement solaire poursuivant son cours, la hausse des températures finira par influer sur le bouillon primordial (ou terminal en l'occurrence): l'eau des océans. Comment? Des laboratoires se sont plongés dans la modélisation du climat futur, quand la température dépassera de 10, 20 ou 100 °C la moyenne actuelle (15 °C). Si leurs avis divergent sur le timing et le déroulé des événements, le scénario classique, celui du "syndrome de Vénus", voit se succéder hausse de l'évaporation marine, amplification de l'effet de serre par la vapeur dégagée, emballement du phénomène – la température terrestre pouvant atteindre 1 400 °C. Avec en point d'orgue la disparition des mers et la dispersion de notre précieuse eau dans l'espace: l'humidité s'élève dans les plus hautes couches de l'atmosphère où le rayonnement se charge de dissocier les molécules d'oxygène et l'hydrogène, ces dernières s'échappant définitivement de la Terre. *"Cette évaporation est un changement de régime radical quand on sait que les océans perdent normalement un millimètre par million d'années"*, souligne Gilles Ramstein, du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement.

Les plus anciennes estimations étaient les plus pessimistes (avec un début d'évaporation d'ici 150 petits millions d'années), mais les modèles récents tenant compte de la nébulosité, des saisons, etc. reculent largement la date de disparition de l'eau. Jérémy Leconte, du Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux, a ainsi calculé qu'un emballement de l'effet de serre pourrait ne se produire que d'ici un bon milliard d'années, alors que la température frôlerait les 70 °C. Et précise que *"l'évaporation se passerait très vite, à une échelle de temps climatique de quelques centaines d'années"*.

ILLUSTRER.FR - M.KONTENTE

En 2015, le modèle d'Eric Wolf, du Laboratoire de physique atmosphérique et spatiale (université du Colorado) repoussait encore l'échéance : *"D'ici 1,2 milliard d'années, nous prévoyons une hausse brutale de 15 °C, avec un climat humide et pluvieux. Puis, dans 1,9 milliard d'années, l'eau commencera à fuir vers l'espace. Dans 2 milliards d'années, la Terre sera transformée en désert comme Dune ou Tatooine, avant même que l'emballement de l'effet de serre n'ait vraiment pu s'engager."*

DES NUAGES DÉMESURÉMENT ENFLÉS

Dans l'absolu, pour les derniers résistants microbiens, ça ne changera pas grand-chose… Jack O'Malley-James, de l'université Cornell, s'est penché sur ces unicellulaires multirésistants à l'absence d'oxygène, à la chaleur, aux sels, aux radiations, etc. Et a déterminé leurs probables ultimes refuges : l'eau, tant qu'il y en aura ; les profondes tranchées océaniques, qui conserveront un temps une certaine fraîcheur ; les interstices subterrestres où on découvre depuis peu de véritables écosystèmes ; les nuages, qui auront démesurément enflé, et que colonisent les bactéries.

Au final, quels que soient le scénario et son point final, entre 1,6 et 2,8 milliards d'années, l'histoire de la vie terrestre s'arrêtera à une température que rappelle l'astrobiologiste : *"150 °C. Parce qu'au-delà, l'ADN lui-même se dénature"*…

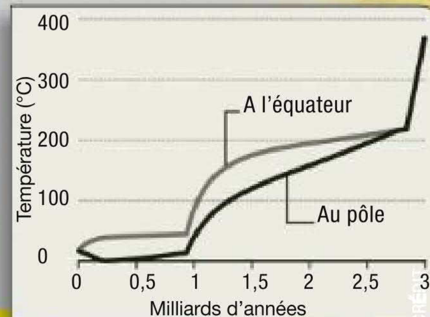
E.R.

Et la vie dans tout ça ?

Les derniers micro-organismes survivants, quelle que soit leurs niches, n'ont d'autre choix que de devenir des "poly-extrêmophiles" : résistants à la chaleur (thermophiles), au manque d'eau (xérophiles), au sel (halophiles), à l'acidité (acidophiles), etc. Des bactéries (*Bacillus infernus*…) et des archées (*Sulfolobus acidocaldarius*…) témoignent de ces adaptations possibles.

A partir de 70 °C l'effet de serre pourrait s'emballer

Les modélisations prévoient un changement de régime radical de l'atmosphère dans un milliard d'années : à partir de 70 °C, les océans s'évaporent et cette vapeur d'eau provoque un emballement de l'effet de serre. Aux pôles et à l'équateur, les températures s'envolent.



SOURCE : JACK O'MALLEY-JAMES

À LA UNE

De 3 à 5 milliards d'années

LA TERRE BASCULE DANS LE CHAOS

L'avenir de notre planète n'est pas seulement une affaire de climat, de dérive des continents, d'océans, de faune et de flore. D'insoupçonnées forces astronomiques sont aussi à l'œuvre, capables de faire basculer, d'ici 2 à 4 milliards d'années, l'axe de rotation de la Terre – les pôles se retrouveraient alors au niveau de l'équateur actuel ! –, ou de faire en sorte que son orbite croise dangereusement celle de… Vénus ou Mars, qui apparaîtront soudain dans notre ciel. Un monde très étrange à nos yeux.

Car, pour commencer, le couple ancestral formé par la Terre et la Lune est amené à se distendre. En effet, la dissipation des forces de marée au sein des structures terrestres ralentit progressivement la rotation de la Terre, ce qui entraîne un éloignement de la Lune à raison de 4 cm par an. *"Au bout du compte, le système arrivera à un équilibre où la Terre tournera sur elle-même en 47 jours, au même rythme que l'orbite lunaire"*, explique Jack Lissauer, planétologue à la Nasa. Sauf que *"l'éloignement de la Lune va estomper l'effet stabilisateur de notre satellite sur l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre,* avertit Philippe Robutel, astronome à l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides. *Les calculs montrent que cet axe peut alors être animé de mouvements irréguliers de grande amplitude"*. Les chercheurs de l'Observatoire de Paris aboutissent à des inclinaisons pouvant aller jusqu'à 89,5°, au lieu des très robustes 23,4° actuels ; dans l'atmosphère d'aujourd'hui, un si grand épanchement entraînerait de violentes variations de températures sous nos latitudes, de −25 °C à +50 °C.

Faut-il s'étonner d'une telle instabilité ? Pas vraiment : *"A l'échelle d'une civilisation, le système solaire paraît stable, mais si l'on prolonge son fonctionnement sur de très longues durées, les effets dynamiques se font sentir et des phénomènes vio-*

ILLUSTRER.FR - M.KONTENTE

lemment chaotiques peuvent émerger", éclaire encore Philippe Robutel.

COLLISIONS INTERPLANÉTAIRES

Chaque planète voit en effet ses paramètres (angle et orientation de son axe de rotation, forme et inclinaison de son orbite…) évoluer subtilement et interagir avec les autres corps, jusqu'à parfois déclencher des phénomènes de résonance. Une équipe de l'Observatoire de Paris a ainsi simulé les possibles évolutions du système solaire : dans environ 1 % des 2501 solutions obtenues, l'orbite de Mercure se déforme tant qu'elle déstabiliserait au bout de 3,3 milliards d'années l'ensemble des planètes telluriques, conduisant dans certains cas à l'éjection de Mars du système solaire ou à la plongée de Vénus dans le Soleil, mais surtout à des collisions entre la Terre, Mars et Vénus. *"L'énergie dissipée par de tels chocs ferait fondre notre planète"*, anticipe Gregory Laughlin, astrophysicien à l'université Yale.

Quand bien même le système solaire conserverait un régime à peu près stable, l'évolution de notre étoile se chargera de mettre fin à ce bel agencement. **V.N.**

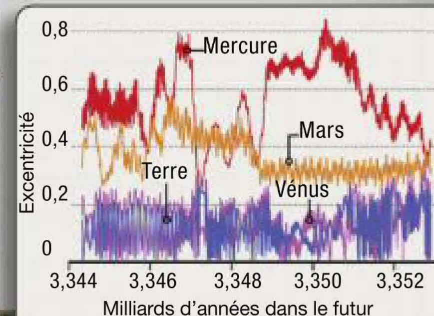
Et la vie dans tout ça ?

À LA UNE

Plus une goutte d'eau, plus une molécule de CO_2, une atmosphère brûlante : la vie en surface paraît exclue, sauf mutation improbable. Mais qui sait ce que l'on pourrait trouver en dessous ? Les biologistes n'ont cessé de découvrir, ces dernières années, des micro-organismes actifs jusqu'à 4000 m sous terre. Une vie aux propriétés étonnamment… banales.

Mars, Vénus, Mercure et la Terre entrent en résonance

Les projections de trajectoires montrent que dans 3,3 milliards d'années, les orbites de la Terre, Mars, Vénus et Mercure pourraient entrer dans une phase chaotique (ici la variation de son excentricité, qui mesure le caractère plus ou moins allongé de son ellipse).



SOURCE : JACQUES LASKAR

De 5 à 8 milliards d'années

LE SOLEIL, GÉANTE ROUGE, ENGLOUTIT LA PLANÈTE

Le spectacle s'annonce éblouissant – un peu trop, honnêtement. Il faut imaginer une boule rougeoyante envahissant notre ciel, 3 000 fois plus lumineuse que le Soleil actuel, prenant toujours un peu plus d'ampleur au fil des millénaires, et s'approchant inéluctablement de notre planète déjà brûlante et asséchée.

L'avenir du Soleil ne fait pas beaucoup de doute. Dans 6 milliards d'années, le cœur de notre étoile aura consommé ses réserves d'hydrogène, lesquelles auront fusionné pour devenir de l'hélium. L'astre entrera alors dans sa phase "géante rouge". *"Un nouvel équilibre physique s'installe au sein de l'étoile,* expose Stéphane Mathis, chercheur au Laboratoire dynamique des étoiles et leur environnement (CEA Saclay). *Le cœur d'hélium va se contracter, augmentant ainsi sa température et permettant aux couches d'hydrogène qui l'entourent d'entrer en fusion nucléaire, ce qui fera enfler les parties supérieures du Soleil."* Notre astre devrait ainsi gonfler pendant environ 2 milliards d'années, jusqu'à atteindre 200 fois sa taille actuelle. Après une période de reflux, la fusion nucléaire de l'hélium s'enclenchera pour environ 500 millions d'années, entraînant une expansion de l'atmosphère solaire encore plus imposante, stade ultime de la géante rouge.

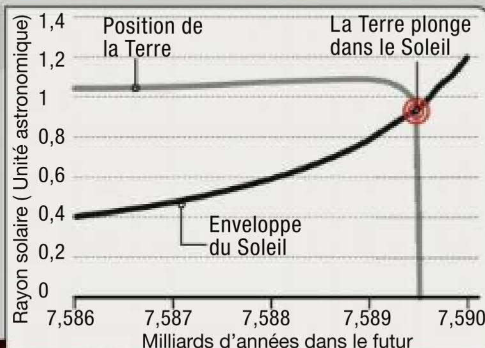
Il paraît clair que les planètes plus éloignées du Soleil – Mars et *a fortiori* Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune – échapperont au monstre ; mieux, la zone d'habitabilité migrera vers leurs orbites à mesure que le Soleil prendra de l'ampleur.

CHUTE EN SPIRALE

Mais que deviendra la Terre ? Située à 215 rayons solaires du Soleil, notre planète se trouve à la lisière du danger. Depuis plus de dix ans, le débat fait rage pour savoir si notre planète sera englobée par l'atmosphère de la géante rouge ou épargnée de justesse – bien que largement grillée. *"Ce n'est pas clair, car plusieurs phénomènes physiques agissent en même temps avec parfois des effets opposés"*, remarque Lorenzo Iorio, physicien à l'université de Bari. D'un côté, le Soleil va perdre de plus en plus de matière, environ 50 % de sa masse, ce qui permettra à la Terre de s'échapper vers des orbites hors de portée de la géante rouge. De l'autre, analyse Eva Villaver, astrophysicienne à l'université autonome de Madrid, *"les gigantesques mouvements de convection entre le noyau et l'enveloppe de la géante rouge vont exercer des forces de marée sur la Terre et rapprocher son orbite du Soleil"*. Ces phénomènes turbulents sont difficiles à modéliser. *"C'est un champ de recherche très récent, il n'existe pas encore de modèle d'évolution du système solaire tenant compte de la structure de l'étoile centrale au cours du temps"*, soupire Stéphane Mathis. Néanmoins, les dernières simulations font pencher la balance vers… un engloutissement de notre planète. *"D'après nos calculs, les*

En gonflant, le Soleil vient happer la Terre

De récents calculs astrophysiques scellent le destin de la Terre. A mesure que l'enveloppe du Soleil s'approche de notre planète, des forces de marée s'intensifient et en viennent à l'attirer irrémédiablement… Jusqu'à l'engloutir.





forces de marée ainsi que les frottements qui s'exercent sur la Terre, dès lors qu'elle pénètre dans l'atmosphère solaire, vont faire plonger en spirale notre planète vers le cœur de l'étoile", tranche Robert Smith, de l'université du Sussex (R.-U.).

Les conséquences de ce grand plongeon ont été peu étudiées à ce jour. Il reste que, une fois baignée par les bords de la géante rouge à environ 4 500 °C, les géologues ne donnent pas cher de la croûte terrestre: *"Les roches granitiques fondent dès 700 °C; on peut donc s'attendre à la formation d'un magma et à d'intenses dégazages, un peu comme sur la Terre primitive"*, avance Bruno Dhuime, géochimiste à l'université de Bristol. Une fois la planète engagée au sein de la géante rouge, *"il n'y a plus aucun espoir pour la structure terrestre,* tranche Jean-Claude Passy, physicien stellaire à l'université de Bonn (Allemagne). *Nos premiers calculs montrent que la Terre devrait être détruite en quelques années seulement par les instabilités dynamiques générées par les frottements au sein de cette atmosphère qu'elle traverse à 30 km/s, à moins que la température croissante à mesure que l'on s'approche du cœur de la géante ne se charge de la désintégrer"*.

Fin de l'histoire? Pas tout à fait… **V.N.**

ILLUSTRER.FR - M.KONTENTE

Et la vie dans tout ça ?

A mesure que le Soleil enflera, la zone d'habitabilité du système solaire se décalera de la Terre vers Mars, puis Jupiter, Uranus, Saturne, Neptune – et leurs satellites – voire ponctuellement Pluton et la ceinture de Kuiper. Ces corps ne manquent pas de matière organique ni de calotte glaciaire susceptible de se transformer en océans. Mais cette prospérité sera temporaire.

A partir de 8 milliards d'années

LA TERRE RENAÎT DE SES CENDRES ?

Une boule de lumière blafarde entourée d'un nuage de poussières et de gros rochers : voilà la scène finale de notre monde. Un tableau qui évoque irrésistiblement… les débuts du système solaire. A ceci près que la boule lumineuse n'est plus une jeune étoile en fusion nucléaire, mais une sphère ultradense de carbone et d'oxygène de la taille de la Terre, portée à 200 000 °C – une naine blanche –, tandis que les débris en question sont autant de lambeaux de Mercure, Vénus et la Terre.

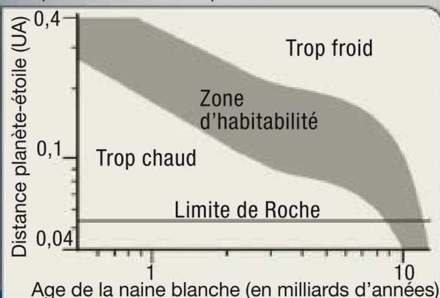
"Nous avons repéré, autour d'un grand nombre de naines blanches, des nuages de débris solides et gazeux, vestiges de planètes telluriques disloquées", témoigne Boris Gaensicke, astrophysicien à l'université de Warwick (R.-U.). Or, ces anneaux de matière sont loin d'être inertes : scrutés durant une partie de l'année 2015, les agrégats orbitant autour de la naine blanche WD1145+017 paraissent en constante évolution. *"Certains astrophysiciens imaginent que ces nuages pourraient s'accréter pour former de nouvelles planètes, un 'système solaire de seconde génération' !"*, s'enthousiasme le chercheur. La proposition reste pour l'heure toute théorique : aucun phénomène de la sorte n'a été saisi sur le vif, et la quantité de matière tout comme le champ de forces disponibles pourraient être insuffisants – la présence d'un astre compagnon paraît nécessaire. Mais d'autres phénomènes pourraient alimenter ce nouveau système. Ainsi, la perte de masse du Soleil devrait déstabiliser les planètes lointaines survivantes, et certaines seraient susceptibles de migrer aux abords de la naine blanche.

LA VIE, TECHNIQUEMENT POSSIBLE

En tout cas, la question se pose sérieusement au sein de la communauté des astrobiologistes : la vie pourrait-elle émerger ou ré-émerger autour de ces astres dégénérés ? Les premiers milliards d'années semblent proscrits, étant donné la température excessive de ces corps et leur spectre lumineux trop copieux en rayons X et UV. Une fois les premières étapes de refroidissement d'une naine blanche franchies, au moins 3 milliards d'années s'offriraient à l'habitabilité, au sens de la possibilité d'eau liquide… *"Cette zone habitable serait centrée autour de 1 % de la distance actuelle entre la Terre et le Soleil,* expose Eric Agol, astrophysicien à l'université de Washington. *Depuis cette distance, la naine blanche aura même un aspect très similaire à celui du Soleil vu depuis la Terre aujourd'hui !"* Certes, la vie autour d'une naine blanche a ses inconvénients : les énormes effets de marées provoqués par cet astre si proche pourraient déstabiliser l'atmosphère et imposent à ses planètes de présenter toujours la même face au "soleil" – l'autre étant constamment plongée dans le noir. Mais, techniquement, la vie est possible.

Une planète pourrait se reformer près d'une naine blanche

Selon de récentes études, il existe autour des naines blanches une zone d'habitabilité où la présence d'eau liquide est possible. Cette zone évolue à mesure que cet astre se refroidit : d'abord trop chaud, puis propice à la vie complexe, et enfin trop froid.



SOURCE : ERIC AGOL



ILLUSTRER.FR - M.KONTENTE

Desséchés par l'épisode "géante rouge", *"ces objets pourraient recevoir de l'eau par un bombardement de comètes,* suggère Lilia Ferrario, chercheuse à l'Université nationale australienne. *Après tout, la Terre a aussi débuté son histoire dans des conditions très arides et inhospitalières". "Certains chercheurs évoquent désormais des planètes de la seconde chance"*, confie Stéphane Charpinet, du Laboratoire d'astrophysique de Toulouse. Avant de conclure : *"Après plusieurs milliards d'années, cette période d'habitabilité va s'éteindre progressivement à mesure que la naine blanche se refroidira et que sa lumière s'atténuera."* Il ne restera alors plus que des corps inertes, froids et isolés dans un Univers en expansion accélérée pour des milliers de milliards d'années. **V.N.**

Et la vie dans tout ça ?

Et si la vie repartait sur de nouvelles bases ? Même s'il sera difficile de se passer de carbone, les biochimistes envisagent aussi une vie à base de silicium, d'azote ou de phosphore – non sans défis. Quant à l'eau liquide, indispensable au vivant tel que nous le connaissons, elle pourrait être remplacée par de l'ammoniac. En tout cas, le champ des possibles est rouvert.

LA TERRE N'AURA ÉTÉ QUE LE DÉBUT DE L'AVENTURE

Après nous le déluge ? Bien au contraire ! La fin de notre monde n'est pas la fin "du" monde, et les astrophysiciens le réalisent depuis peu : à l'échelle de l'Univers, l'histoire – la vie, même ! – ne fait que commencer.

Vertigineuse histoire, tout de même, que celle des 9 milliards d'années de notre système solaire… Le Soleil, d'abord fière naine jaune, devient géante rouge pour finir naine blanche, tandis que notre Terre passe de boule magmatique à belle orange bleue puis à pépin carbonisé – le tout au milieu d'un jeu de quilles galactique aux multiples rebondissements, l'apparition de la vie n'étant pas le moindre.

Mais même si le système pourrait se voir offrir *in extremis* une "seconde chance" (lire pages précédentes), cette histoire a fatalement une fin : ce spectacle incomparable, déjà à moitié joué, s'achèvera dans un silence de mort, dans la plus pure tradition de la tragédie grecque. Nul doute que Sophocle aurait été satisfait – à moins qu'il n'eût entraperçu derrière notre drame personnel une œuvre plus large, cosmique à défaut d'être divine.

Car à ce niveau précisément cosmique, tout ceci pourrait être une simple entrée en matière, et non la conclusion. La fin de notre monde n'est pas la fin du monde. Notre chapitre terrestre n'est probablement que la préface d'un ouvrage galactique autrement plus vaste et complet, le prologue d'une encyclopédie universelle !

De fait, armés de notre anthropocentrisme coutumier, nous avons tendance à prendre notre cas pour une généralité : en l'occurrence, à condamner l'Univers en même temps que notre banlieue solaire. Or, ledit Univers, du haut de ses 13,8 milliards d'années – la Terre en a 4,6 –, conserve hors notre cas personnel bien des arguments à faire valoir, sous la forme d'accortes planètes douées d'une longévité à faire pâlir Mathusalem.

LA TERRE : UNE PIONNIÈRE

Ne soyons donc pas mesquins : il n'y a pas de raison que la vie finisse avec nous. Il y a même de moins en moins de raisons de le croire !

Il faut savoir que dans leur traque éperdue des structures qui peuplent l'Univers (d'autres galaxies, étoiles, planètes), les astrophysiciens ont longtemps négligé une variable : le temps. *"Beaucoup de questions sur notre place dans l'Univers se concentrent sur notre seule localisation dans l'espace : sommes-nous sur une orbite spéciale autour du Soleil ? Notre étoile est-elle à un endroit particulier de la galaxie ? Ou bien est-ce notre galaxie ?*, décline David Sloan, de l'université d'Oxford. *Nous, nous avons voulu savoir si nous étions à un moment particulier. Nous avons donc regardé quand les planètes susceptibles d'héberger la vie avaient le plus de chances de se former au cours de l'histoire de l'Univers."* Et devinez quoi : derrière les futurs vestiges de notre Eden carbonisé, le meilleur est sans doute à venir…

L'an dernier, Peter Behroozi et Molly Peeples, de l'Institut des sciences du télescope spatial de Baltimore, ont été les premiers à jeter un pavé dans le cosmos. *"Nous pensions que la Terre était assez tardive, puisque le système solaire s'est formé après 80 % des autres étoiles de la Voie lactée*, se rappelle Peter Behroozi. *Mais ensuite, nous avons réalisé que cela ne comprenait pas les étoiles encore à venir ! Et tout a changé…"*

Les astronomes ont donc patiemment compté les astres qui ne sont pas encore nés. Ils ont compilé les données du programme Sloan Digital Sky Survey pour estimer le nombre d'étoiles actuelles, celles du satellite *Planck*

DARK SKY SIMULATIONS COLLABORATION - B.BELLANGER

Dans l'Univers, la vie va devenir de plus en plus probable

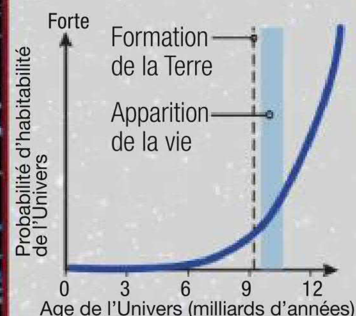
pour la quantité de matière permettant d'en former de nouvelles, et celles du télescope spatial *Hubble* pour leur rythme de création. Et leur conclusion est fascinante. *"La Terre s'est formée avant 92 % des planètes du même type de l'Univers*, s'enthousiasme le chercheur. *Il s'en formera encore 10 fois plus que ce qui existe déjà !"* La Terre fait donc sans doute partie des valeureux pionniers de la grande aventure de la vie dans l'Univers.

Et la perspective est encore plus impressionnante si l'on prend en compte la longévité des étoiles et des planètes qui tournent autour. Car plus une étoile est petite, plus elle brille longtemps : alors qu'une naine jaune de la taille de notre Soleil brûle pendant 10 milliards d'années, une naine rouge 10 fois plus petite brillera 100 fois plus longtemps.

En 2013, Andrew Rushby, de l'université d'East Anglia (Angleterre), s'est penché sur une trentaine d'exoplanètes habitables répertoriées. Quand la période d'habitabilité de la Terre s'étend sur 6,3 à 7,2 milliards d'années, il a calculé qu'elle monte à 14,2 milliards d'années pour HD 40307g, par exemple, et atteint même 54,7 milliards d'années pour Gliese 581d. C'est dire qu'ailleurs, certaines planètes ont beaucoup, beaucoup de temps devant elles pour voir se développer sur leurs flancs de petites formes de vie…

Or, comme le souligne le chercheur, *"la longévité d'une zone d'habitabilité est particulièrement importante quand on s'intéresse à l'évolution d'une* →

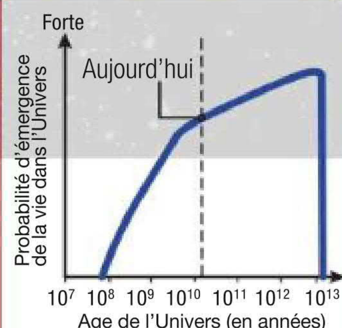
Le cosmos sera moins dangereux à l'avenir



L'Univers actuel est 2,5 à 20 fois moins pollué par des rayons X et gamma que lorsque la vie est apparue sur Terre. Il est donc d'autant plus habitable, et devrait le devenir encore plus dans les milliards d'années à venir.

SOURCE : HABITABILITY OF THE UNIVERSE THROUGH 13 BILLION YEARS, P.DAYAL ET AL., 2016

Les étoiles seront plus accueillantes



En tenant compte des petites étoiles, qui sont nombreuses et vivent très longtemps, les chercheurs ont calculé que le pic de probabilité d'apparition de la vie est loin d'être atteint.

SOURCE : RELATIVE LIKELIHOOD FOR LIFE AS A FUNCTION OF COSMIC TIME, A.LOEB, D.SLOAN ET AL., 2016

Des milliards de Terre potentielles

92 % C'est le pourcentage de planètes similaires à la Terre… qui ne sont pas encore nées.

vie complexe, qui peut demander plus de temps". Rappelons qu'il aura fallu 2 milliards d'années pour qu'apparaissent les premières cellules à noyau sur Terre, et presque 2 milliards de plus pour que s'échafaudent péniblement les organismes pluricellulaires.

Cet été, David Sloan, avec Avi Loeb, de Harvard, a prolongé les calculs de Behroozi et Peeples en intégrant ce paramètre de la longévité. *"Nous avons considéré la probabilité d'apparition de la vie telle que nous la connaissons entre la formation des premières étoiles, 30 millions d'années après le big bang, et la mort des dernières, dans des dizaines de milliers de milliards d'années*, résume-t-il. *Et nous avons trouvé que le pic est largement devant nous, centré autour des étoiles de faible masse." "Cela s'explique parce que ces étoiles, des naines rouges notamment, vivent très, très longtemps*, ajoute son collègue. *Non pas que la vie ne devrait pas être sur Terre maintenant, mais il est plus probable qu'elle soit plus abondante partout dans le futur."*

AUTOUR DE PROXIMA DU CENTAURE

Les calculs publiés en parallèle par l'équipe de Pratika Dayal (université de Durham, Angleterre), sur l'évolution des radiations dans l'Univers, vont dans le même sens. Car, dans sa turbulente jeunesse, notre Univers a multiplié les étoiles puissantes qui, en mourant, ont libéré quantité de rayons cosmiques, X ou gamma, très dangereux pour le vivant – du même type que ceux pointés comme responsables d'extinctions jusque sur notre planète. Or, passé ces trois premiers milliards d'années, les radiations ont diminué avec le ralentissement de la formation de nouvelles étoiles. Résultat, *"l'Univers est 2,5 à 20 fois plus habitable aujourd'hui que lorsque la vie est apparue sur Terre, il y a 4 milliards d'années*, concluent les chercheurs. *Nous avons aussi trouvé que cette hausse de l'habitabilité allait se poursuivre au cours des centaines de milliards d'années à venir, jusqu'à ce que les dernières étoiles disparaissent"*.

Et après demain… la fin de l'Univers

Une fois les derniers nuages de gaz effondrés pour donner naissance aux ultimes étoiles et planètes, qu'adviendra-t-il de l'Univers ? C'est l'une des grandes questions de la cosmologie. La réponse varie suivant les modèles. *"Tout dépend en particulier de la nature de l'énergie noire"*, précise Nicolas Prantzos (Institut d'astrophysique de Paris).

Si cette mystérieuse composante qui accélère l'expansion de l'Univers demeure constante, comme le prévoit le modèle dominant, le cosmos continuera de s'étendre indéfiniment. Dans 100 000 milliards d'années, les dernières étoiles auront explosé et leurs restes alimenteront les trous noirs qui règnent au cœur de chaque galaxie. Mais même ces monstres cosmiques finiront par s'évaporer, dans 10^{100} années*.

Seuls de rares vestiges d'étoiles, d'astéroïdes et de poussières demeureront alors. La suite dépendra du proton, cette particule qui compose les noyaux atomiques et dont on ignore le comportement aux très basses énergies. S'il est parfaitement stable, la matière se transmutera en fer, seul atome qui ne se désintègre jamais naturellement. Il ne restera plus, alors, que des boules de fer de toutes les tailles, pour l'éternité. Mais si le proton est instable, toute la matière finira par se désintégrer pour ne plus laisser, dans quelque 10^{793} ans, qu'un néant en expansion. **M.F.**

* soit 10 milliards de milliards de milliards de milliards de milliards de milliards de milliards de milliards de milliards de milliards de milliards d'années !

Bien sûr, tout ceci est largement théorique et reste discuté. En particulier, la question de savoir si les petites étoiles prises en compte sont réellement habitables. Elles pourraient en effet pulser dans leur jeunesse et évaporer du même coup l'atmosphère de leurs planètes, stérilisant ainsi leur système… *"Nous sommes à un moment très intéressant de la collecte de données*, note David Sloan. *Il y a quelques semaines, il a été annoncé qu'il semble y avoir une planète en zone habitable autour de Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche de nous et qui est justement de faible masse. C'est excitant !"*

A l'échelle de temps de l'Univers, les choses sérieuses ne font-elles donc que commencer pour la vie ? *"C'est compliqué d'être certain avec les données dont nous disposons*, reconnaît David Sloan. *Mais des travaux comme ceux de Behroozi et Peeples ainsi que ceux de Dayal semblent tous montrer que la vie va devenir plus probable."*

Comme toute histoire, celle de la vie dans l'Univers aura aussi sa fin. Une fois que les dernières étoiles se seront éteintes, que le dernier coin habitable du cosmos aura disparu, l'Univers continuera d'évoluer (lire ci-dessus), même si plus personne ne sera là pour l'admirer.

Mais d'ici là, il y a tout le temps ! *"Il y en a en tout cas encore largement assez pour que la vie se forme et peuple l'Univers…"*, conclut David Sloan.

Réjouissante perspective. En tout cas pour ceux qui considèrent que la petite page de notre histoire ne sera que plus belle si elle figure dans un livre plus grand que nous, que nous puissions le lire ou non. **E.R.**



A lire : les nombreuses études qui nous ont servi à construire ce dossier, et quelques références de livres traitant scientifiquement de la fin du monde.
A voir : des vidéos toujours réjouissantes, comme la simulation d'une collision de la Terre avec Vénus ou Mars.

*** EN SAVOIR PLUS**

science-et-vie.com

Science & découvertes

M.HOLLY/CREATIVE SERVICES/UNIVERSITY OF ALBERTA - AMÉLIE-BENOIST/BSIP - COURTESY OF CELL SIGNALING TECHNOLOGY AND OZYME - DR

Météorite du lac Tagish

Le caillou du bout du monde

C'est un petit bout d'astéroïde tombé sur Terre il y a seize ans. Selon les dernières analyses, il viendrait de la ceinture de Kuiper. Soit des confins de notre système. Un périple incroyable… qui éclaire la genèse de notre monde, nous dit **Mathilde Fontez.**

Le caillou est sombre, presque noir, truffé de petites inclusions colorées. On dirait un morceau de charbon. Il est tombé du ciel le 18 janvier 2000, dans le nord-ouest de la Colombie-Britannique, au Canada. Il a d'abord explosé dans le ciel, à une trentaine de kilomètres d'altitude, avant de s'abattre en pluie sur le lac Tagish. Par chance, celui-ci était gelé. C'est ce qui a permis de mettre la main sur l'une des météorites les plus extraordinaires jamais recueillies.

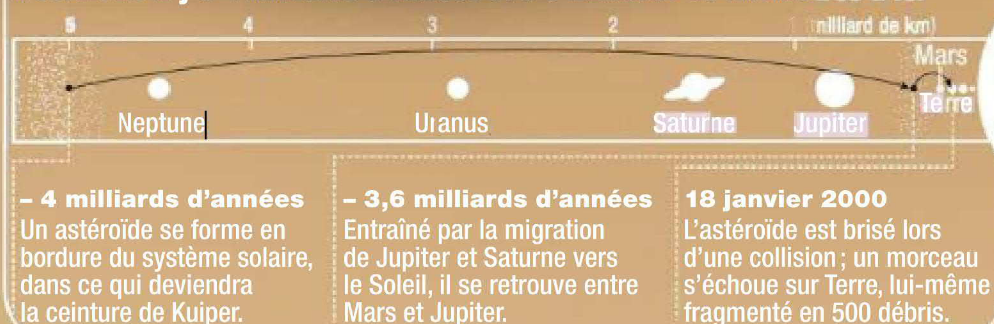
Dans les jours qui suivirent la chute, des fragments de la pierre extraterrestre furent rapidement collectés. *"L'un des habitants de la région, qui avait ramassé la majorité d'entre eux, a eu la bonne idée de les mettre au congélateur*, relate Chris Herd, l'un des spécialistes qui ont analysé la météorite à l'université de l'Alberta. *Ils n'ont donc jamais connu de température supérieure à 0 °C ! Leur qualité est proche de celle que l'on pourrait avoir avec une mission* [spatiale] *de retour d'échantillons."*

Au final, 500 fragments ont été retrouvés. Un consortium s'est formé au Canada pour organiser leur analyse. Les laboratoires se sont partagé les spécimens et, dans les années qui ont suivi, les publications se sont multipliées.

Si "Tagish Lake" est la météorite la mieux conservée jamais découverte, les conclusions de ces études ont montré que c'est aussi – et surtout – la plus atypique : elle est à la fois la plus riche en carbone et la moins dense. Elle n'entre dans aucune des catégories dans lesquelles les minéralogistes rangent les pierres extraterrestres. Son aspect primitif, sa faible densité, sa composition isotopique en oxygène et le fait qu'elle soit composée presque exclusivement de la "matrice" (la matière brute composant le disque de poussières qui entourait le Soleil à l'origine) l'orienteraient vers la catégorie des chondrites CI, des météorites très rares, riches en eau et

Repères

La plupart des astéroïdes se situent en bordure du système solaire, après Neptune, dans la ceinture de Kuiper, à plus de 30 unités astronomiques (UA, la distance Terre-Soleil) de nous. Le reste est rassemblé entre Mars et Jupiter, dans la ceinture principale, à 2,8 UA de la Terre ; c'est de là que proviennent les météorites.



MICHAEL HOLLY, CREATIVE SERVICES, UNIVERSITY OF ALBERTA - B.BELLANGER

en carbone. Oui, mais elle est truffée de grains de silicates et de petites poches de matériaux formés à haute température… ce qui la rangerait plutôt dans la famille des chondrites CM, une catégorie dont la plus célèbre représentante est la météorite de Murchison, tombée en Australie en 1969.

Bref, *"Tagish Lake est unique !"*, tranche Brigitte Zanda, spécialiste des chondrites au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

LES PLANÈTES MIGRENT

D'où vient-elle ? Où s'est-elle formée ? A quel astéroïde la raccrocher ? Aujourd'hui, une hypothèse prend forme, étourdissante. La météorite serait née à 5 milliards de kilomètres de la Terre, dans cette zone obscure au-delà de Neptune où gravitent la naine Pluton et des milliards de corps glacés : la ceinture de Kuiper. *"Elle en serait le tout premier échantillon"*, affirme William Bottke, astrophysicien au Southwest Research Institute (Boulder, Etats-Unis), auteur d'une étude défendant cette hypothèse. Tagish Lake serait ainsi le plus lointain des cailloux qui nous soit jamais parvenu, celui ayant fait le plus long voyage !

Grâce à l'arrivée de modèles informatiques dynamiques, on sait que le système solaire, loin d'être statique, a vu ses corps migrer au fil de ses milliards d'années d'existence. Les deux scénarios de référence, les modèles de Nice et du Grand Tack ("grand virement de bord"), publiés en 2005 et 2011, montrent en effet comment les deux géantes, Jupiter et Saturne, ont migré vers le cœur du système solaire il y a 3,6 milliards d'années, entraînant avec elles des nuées d'astéroïdes qui ont fini par se stabiliser à des milliards de kilomètres de là où ils sont nés (voir *S&V* n° 1055, p. 78 et n° 1128, p. 54).

Ainsi, alors qu'on pensait que la ceinture principale

d'astéroïdes, entre Mars et Jupiter, était simplement composée de bouts de roche qui n'avaient pu s'agglomérer et étaient restés sur place, en réalité, *"elle constitue une version condensée du système solaire primordial*, résume Pierre Vernazza, spécialiste du sujet au Laboratoire d'astrophysique de Marseille. *On retrouve dans toute leur diversité les corps qui formaient le disque autour du Soleil il y a 4,5 milliards d'années"*… dont les fameux astéroïdes de la ceinture de Kuiper.

"Il ne fait plus de doute qu'entre Mars et Jupiter, il y a un peu de tout mélangé, renchérit Alessandro Morbidelli, auteur des modèles de Nice et du Grand Tack à l'Observatoire de la Côte d'Azur. *Les modèles reproduisent parfaitement la distribution orbitale."*

Ainsi, les astéroïdes métalliques pourraient venir de la région de formation des planètes telluriques ; les astéroïdes carbonés, de la région des planètes géantes ; les astéroïdes de type S, riches en silice, de la zone entre Mars et Jupiter ; et enfin, ceux dits de type D, de la ceinture de Kuiper.

Et justement, les analyses spectroscopiques montrent que la météorite du lac Tagish présente bien des similitudes avec ce type d'astéroïde. *"Les spectres de lumière émis par les astéroïdes D et par Tagish Lake dans le visible et dans l'infrarouge proche correspondent"*, détaille Chris Herd.

Le Graal : trouver une pierre qui viendrait de Mercure

En 2012, Anthony Irving (université de Washington) estimait avoir identifié la première météorite provenant de Mercure. A confirmer. Pour les chasseurs de météorites, ce serait le Graal. Ils ont recueilli des spécimens venant de la Lune et de Mars. Ils n'espèrent pas en recevoir de Vénus, dont l'atmosphère dense protège la surface… Il ne leur manque qu'une météorite de la plus petite des telluriques. Les pierres mercuriennes doivent pourtant bien être là, quelque part sur Terre. *"Mercure est très bombardée, elle doit forcément éjecter des cailloux. Et il n'y a aucun obstacle sur leur trajet jusqu'à nous"*, assure Alessandro Morbidelli. Encore faut-il les identifier. Elles sont peut-être déjà dans un musée, à attendre qu'on les reconnaisse…

D'où l'hypothèse : Tagish Lake serait un morceau d'un astéroïde qui aurait été forgé aux confins du système solaire, avant d'être ramené il y a 3,6 milliards d'années entre Mars et Jupiter, d'où une collision l'aurait délogé et envoyé s'échouer sur un lac canadien (voir schéma p. 69)…

UNE PRÉCIEUSE RELIQUE

Les mesures effectuées grâce au télescope spatial *Spitzer* compliquent cependant l'affaire : le spectre infrarouge moyen des astéroïdes D est différent de celui de la météorite du lac Tagish… Ce qui amène Pierre Vernazza à la conclusion suivante : ce caillou serait un morceau, non pas de la surface d'un astéroïde D, mais de son cœur ! Cela expliquerait à la fois sa structure minéralogique atypique et la différence spectrale dans l'infrarouge moyen. *"On ne mesure les propriétés spectrales que des astéroïdes de taille supérieure à 100 km*, précise le chercheur. *Ce sont pour la plupart des astéroïdes qui n'ont pas subi de collision, ou peu. Ce pourrait être la raison pour laquelle on a du mal à trouver une correspondance parfaite avec Tagish Lake."*

L'hypothèse devra être vérifiée. Il faudra pour cela observer avec une meilleure résolution les astéroïdes de la ceinture principale. C'est pour bientôt, grâce au télescope spatial *James-Webb*, qui succédera à *Hubble* en 2018.

Mais déjà, cela rend l'histoire encore plus belle. Avec Tagish Lake, nous posséderions le cœur intact d'un astéroïde né dans la ceinture de Kuiper. Rien de moins qu'une relique du système solaire primordial, un témoin de sa région la plus inaccessible. De quoi, enfin, statuer sur la composition exacte du nuage qui a donné naissance au Soleil, et comprendre d'où viennent l'eau et les molécules organiques qui ont initié la vie sur Terre…



A consulter : les publications sur l'analyse de Tagish Lake ; le site de la Meteoritical Society, qui recense toutes les informations sur la chute de la météorite.

EN SAVOIR PLUS

science-et-vie.com



Structure du langage

Chomsky avait raison !

Le linguiste américain a, le premier, théorisé l'idée d'une grammaire mentale universelle inscrite dans le cerveau. Une intuition géniale enfin confirmée par les neurosciences ! Explications de **Marie-Catherine Mérat.**

C'est un nouveau genre d'introspection, une façon inédite d'écouter notre petite voix intérieure.

Réalisée par David Poeppel, de l'université de New York, l'expérience représente un moyen particulièrement efficace d'épier le crépitement de notre cerveau lorsque nous lisons ou écoutons des phrases. Et elle vient de confirmer ce que d'autres neuroscientifiques, à commencer par les Français Christophe Pallier et Stanislas Dehaene, avaient déjà perçu ces dernières années : derrière leur diversité, toutes les langues se fondent sur une même structure abstraite, laquelle est implémentée dans l'organisation neuronale du cerveau humain.

De quoi prouver que la grammaire est avant tout mentale : notre cerveau est doté d'une sorte de logiciel, un système de traitement du langage capable d'analyser automatiquement, et de façon largement inconsciente, l'organisation cachée du langage.

Ce concept, on le doit à Noam Chomsky, célèbre linguiste qui, dans les années 1950, a révolutionné sa discipline en introduisant la théorie de la "linguistique générative".

Son principe ? Une phrase n'est pas perçue par notre cerveau comme une séquence plate, mais comme une structure qui opère des regroupements de mots liés par la syntaxe. Prenez par exemple la phrase "Le chien boit le lait du

Repères

Si, jusque dans les années 1950, on considérait que l'enfant apprenait à parler seulement par imitation, cette approche empirique a été remise en cause par le linguiste et philosophe américain Noam Chomsky. Estimant que l'environnement linguistique de l'enfant était trop pauvre pour lui permettre d'acquérir toute la richesse du langage, Chomsky avançait qu'il était prédisposé à en traiter certaines structures. D'où sa théorie d'une grammaire universelle implémentée dans le cerveau.

SHUTTERSTOCK

chat". Selon la théorie chomskienne, l'expression "le lait du chat" forme un syntagme, c'est-à-dire un groupe de mots rendus inséparables – on peut ainsi écrire, au-delà des mots: "C'est le lait du chat que le chien boit" mais non "c'est le lait que le chien boit du chat". Noam Chomsky place cette opération d'unification de deux constituants en un troisième, qu'il appelle "fusion" (*merge* en anglais), au cœur du langage. Elle permet en effet d'imbriquer les constituants les uns dans les autres, en des structures de plus en plus ramifiées: "Le chien de la voisine boit le lait du chat"; "Le chien de la voisine qui vient de s'installer boit le lait du chat", etc. Chaque phrase pouvant ainsi être représentée par un arbre inversé, dont les rameaux seraient les mots, et les branches des groupes de mots.

"DES ARBRES DANS LA TÊTE"

"Depuis les années 1950, Chomsky nous dit: 'Nous avons des arbres dans la tête'. Et la plupart des linguistes s'accordent aujourd'hui sur l'existence de ces représentations hiérarchiques", souligne Anne Christophe, directrice du laboratoire de sciences cognitives et psycholinguistique de l'ENS, à Paris.

Restait à le démontrer. Car, du côté des spécialistes des neurones, la notion de grammaire mentale reste débattue: *"La plupart sont très sceptiques quant à cette idée de représentations abstraites dans le cerveau"*, rapporte David Poeppel.

En pratique, le neuroscientifique américain a enregistré l'activité cérébrale de volontaires chinois et américains en magnéto-encéphalographie. Cette technique mesure en temps réel les champs magnétiques émis par l'activité électrique des neurones pendant qu'ils écoutent ou lisent dans leur langue maternelle plusieurs séries de quatre mots d'une syllabe présentés toutes les 250 millisecondes par un synthétiseur vocal.

Dans certains cas, quatre mots sans lien entre eux sont proposés – une simple liste à la Prévert. Dans d'autres cas, les mots peuvent être groupés deux par deux [little-lambs]-[big-fish] ou former une phrase de quatre éléments composée de deux groupes de deux mots [[new-plans]-[gave-hope]].

Les résultats sont nets. Pour les listes aléatoires de quatre syllabes, l'enregistrement révèle, dans certaines régions cérébrales (les aires auditives notamment), des pics d'activité réguliers toutes les 250 millisecondes (soit une fréquence de 4 Hz), signe que le stimulus acoustique a été traité au niveau cérébral. En revanche, face aux listes de mots pouvant être regroupés deux par deux, vient s'ajouter un second signal à une fréquence deux fois plus lente de 2 Hz, indiquant que l'opération d'unification des deux mots successifs a bien lieu dans le cerveau. Et face aux listes de quatre mots reliés entre eux, sont également captés d'autres signaux, à une fréquence de 1 Hz cette fois, en plus de ceux à 2 et 4 Hz, qui témoignent que les mots ont bien été intégrés par le cerveau comme une phrase entière (voir ci-contre).

Au vu de ces rythmes cérébraux imbriqués les uns dans les autres, le cerveau semble donc bien calculer des structures arborescentes.



Jargon

Syntaxe
Règles et principes qui régissent les relations entre les mots dans les phrases.

Sémantique
Qui a trait au sens des mots, des phrases.

Grammaire
Contraintes sur la manière dont les unités de langage peuvent se combiner.

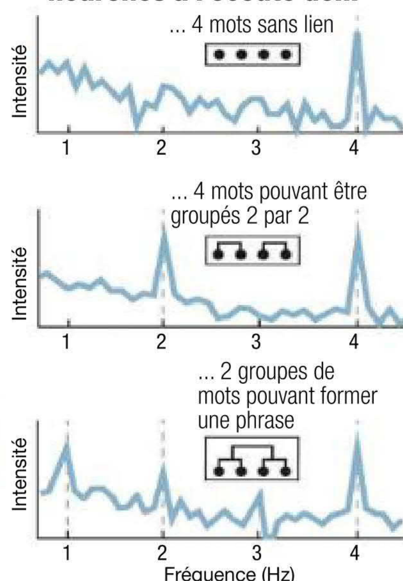
Syntagme
Groupe de mots qui forment une unité dans une phrase.

Tous ces signaux émanent préférentiellement de capteurs situés dans l'hémisphère gauche, dans lequel se situent les aires du langage. *"Nous avons supprimé tous les indices liés à la structure grammaticale, et pourtant, nous montrons que le cerveau répond aux structures syntagmatiques et aux phrases,* observe Nai Ding, qui a participé à l'étude. *Cela indique qu'il peut élaborer la structure du discours simplement sur la base de sa connaissance grammaticale interne."* De quoi confirmer la théorie de Chomsky.

"Quelque part, ce n'est pas surprenant, commente Julie Franck, psycholinguiste à l'université de Genève. *Il est évident que le cerveau doit traiter d'une façon ou d'une autre ces structures en constituants. Ce qui est élégant, c'est d'avoir montré comment cette grammaire mentale se manifeste au niveau des neurones."*

Quant à savoir comment cette grammaire mentale est implé-

L'expérience qui révèle la grammaire mentale



Le neuropsychologue David Poeppel a fait écouter à des volontaires plusieurs séries de 4 mots monosyllabiques présentées toutes les 250 millisecondes, sans indice de tonalité ni de ponctuation, tout en enregistrant leur activité cérébrale par magnéto-encéphalographie. Résultats : quand les 4 mots ne sont pas liés sur le plan syntaxique (en haut), le cerveau s'active toutes les 250 ms (4 Hz). Mais quand ils peuvent être groupés 2 par 2 (ex. : [little-lambs]-[big-fish]), un second signal régulier apparaît toutes les 500 ms (2 Hz), signe que le cerveau effectue le regroupement. Et quand les 4 mots forment une phrase (ex. : [[new-plans]-[gave-hope]]), un troisième signal émerge toutes les 1 000 ms (1 Hz). Cette imbrication des rythmes cérébraux les uns dans les autres démontre que le cerveau traite les phrases comme des arbres syntaxiques.

mentée plus finement dans le cerveau, difficile à dire. *"À l'échelle neuronale, on ne sait clairement pas comment ça marche"*, admet Anne Reboul, directrice de recherche au laboratoire sur le langage, le cerveau et la cognition, à Bron.

UN AVANTAGE ÉVOLUTIF

Selon le modèle élaboré en 1990 par Paul Smolensky, professeur en sciences cognitives à l'université Johns-Hopkins, chaque mot avec sa fonction grammaticale (sujet, verbe…) serait codé par une population spécifique de neurones. Une phrase correspondrait finalement à un motif neuronal unique, constitué de la somme des activations des populations de neurones affectés à chacun de ses constituants. *"C'est un modèle que nous essayons de tester"*, avance Christophe Pallier.

Cette grammaire mentale est-elle innée ? Naissons-nous avec un cerveau pré-câblé pour repérer les structures abstraites du langage ? Comme l'a montré une étude menée en 2010 par Savita Bernal, alors thésarde au Laboratoire de sciences cognitives et psycholinguistique de l'ENS (Paris), le cerveau d'un enfant de deux ans est déjà capable de repérer des violations syntaxiques (comme "La fille prend la mange" au lieu de, par exemple, "Alors elle la mange"). Nombreux sont les travaux qui révèlent également que l'enfant se sert de la syntaxe pour apprendre à parler. *"Les arbres syntaxiques sont sans doute des choses que l'enfant doit détecter très tôt, dans sa première année de vie,* pense Christophe Pallier. *Ou alors cette faculté est complètement innée."*

C'est ce que pense aussi Chomsky. Selon lui, notre propension à regrouper deux constituants en un troisième serait le fruit d'une mutation génétique unique survenue avant même la sortie d'Afrique, qui aurait permis à l'homme de lier les concepts entre eux et donc de structurer sa pensée. Lui conférant un avantage évolutif majeur.

Une observation, notamment, semble appuyer la thèse de l'innéité, celle d'enfants exposés à un "pidgin" à l'âge où l'on acquiert sa langue maternelle. À l'origine, les pidgins sont ces dialectes syntaxiquement très pauvres qu'utilisaient les esclaves de langues différentes pour communiquer dans les plantations. Il s'en crée encore aujourd'hui, parmi des immigrés d'origines diverses amenés à travailler ensemble par exemple. *"Spontanément, les enfants de ces adultes introduisent une grammaire et recréent une langue avec toute la complexité syntaxique des langues naturelles,* rapporte Anne Christophe. *On a beaucoup de mal à savoir d'où ça sortirait, sinon du cerveau des enfants eux-mêmes ?"*

La question n'a pas fini de faire parler.

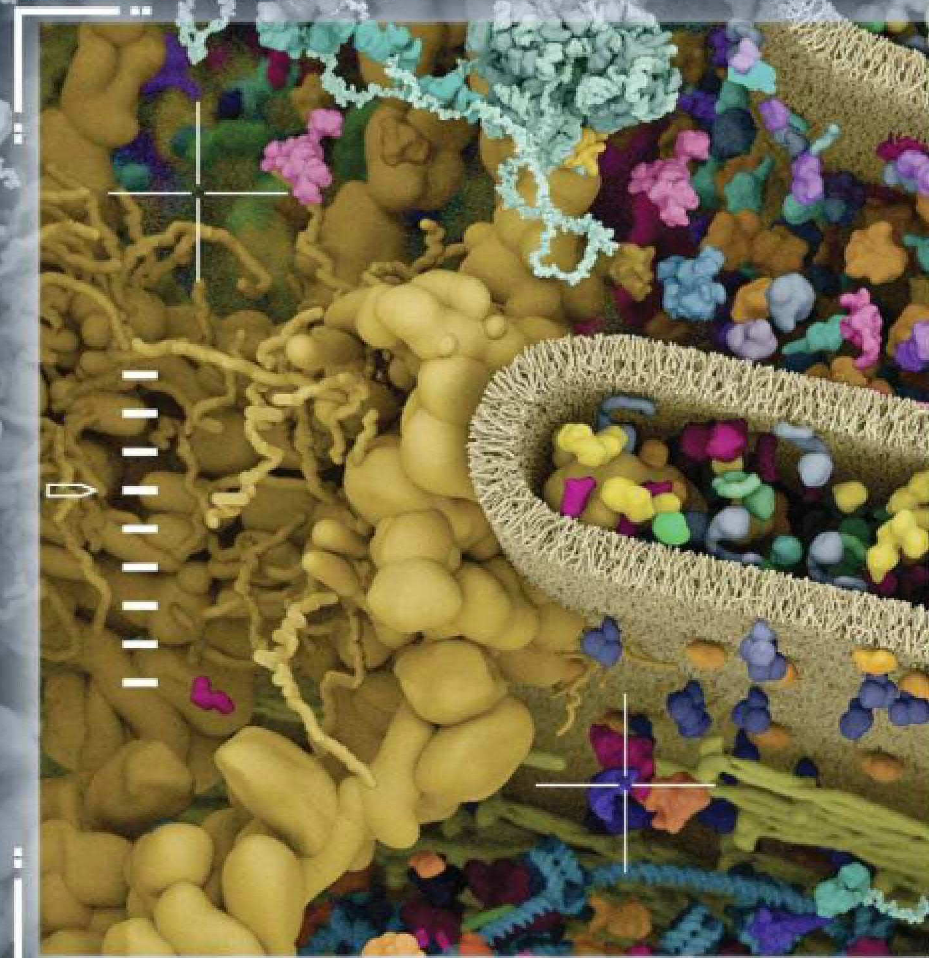
AMELIE-BENOIST / BSIP - B.BELLANGER



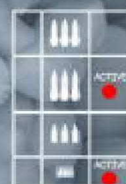
A lire : *L'instinct du langage* de Steven Pinker. A consulter : les cours en ligne de Stanislas Dehaene.

EN SAVOIR PLUS

science-et-vie.com


REC 3X TIME 06:08 DATE 20.09.2016
NW 16° 18° 8082 7206


16°
18°
N
W E
S


ACTIVE
ACTIVE

Le mystère des **protéines fantômes**

Elles ont toujours été là, au cœur de nos cellules… mais incognito. La découverte de milliers de protéines que nul ne soupçonnait est un choc. Car elles pourraient jouer un rôle clé, analyse **Marine Corniou.**

C'est une bombe. Une découverte qui bouleverse nombre de certitudes et donne le vertige face à l'étendue insoupçonnée de notre ignorance.

Jugez plutôt: il y aurait, au cœur de nos cellules, des dizaines de milliers de protéines totalement inconnues. Officiellement, chez l'être humain, les biologistes en répertoriaient jusqu'ici 70 000; et voici qu'il y en aurait en fait deux, trois, voire quatre fois plus!

Information sidérante quand on sait que les protéines sont les ouvrières de la vie, les rouages matériels élémentaires de toute activité. Construites à partir des instructions contenues dans le génome, ces molécules permettent à nos cellules de se structurer, de se réguler, de respirer, bref, d'être vivantes. Eh bien, il faut admettre qu'on ignore encore tout de la grande majorité de ces ouvrières, qui jouent potentiellement un rôle essentiel dans la grande machinerie cellulaire…

"L'impact pourrait être énorme, révolutionnaire", s'enthousiasme Xavier Roucou, biochimiste à l'université de Sherbrooke, au Canada, qui fut le premier, il y a six ans, à se mettre en chasse de ces fantômes, se heurtant longtemps au scepticisme de ses pairs.

Aujourd'hui, de plus en plus de biologistes lui donnent raison. *"Il y a clairement des centaines, voire des milliers de protéines qui sont passées sous le radar. C'est très*

COURTESY OF CELL SIGNALING TECHNOLOGY AND OZYME

Repères

L'ADN humain est constitué de longs filaments moléculaires comptant 3 milliards de nucléotides (A, T, C ou G). Officiellement, 2 % de ce texte génétique contient des séquences codantes, soit environ 20 000 gènes. Lesquels portent les instructions de construction pour environ le triple de protéines (certains gènes pouvant produire plusieurs versions d'une même protéine). Un nombre très sous-estimé, vient-il d'être découvert.

excitant", confirme notamment Jonathan Weissman, chercheur à l'université de Californie, une sommité dans le monde des protéines.

"Nous devons bien sûr rester critiques, mais ce qui se passe est très important. C'est un tournant, et les biologistes n'y prêtent pas encore assez attention", estime de son côté la neurobiologiste américaine Judith Steen, qui a elle aussi réussi à identifier, récemment, plusieurs dizaines de ces ouvrières de l'ombre.

UN SIGNAL PARASITE INCONNU

La chasse a véritablement commencé en 2010. Alors qu'il travaille sur une protéine bien particulière, le prion, Xavier Roucou ne cesse de tomber, dans les cellules qu'il étudie, sur un signal parasite correspondant à une protéine inconnue. *"On a voulu comprendre d'où venait ce signal"*, se souvient-il.

Le biologiste regarde alors de plus près la séquence génétique contenant les instructions de construction du prion. Et sa curiosité est piquée : *"On a découvert qu'il y avait, dans la séquence codante du prion, une séquence codante cachée qui donnait lieu à la production d'une protéine alternative jamais décrite. C'était elle, le fameux signal qu'on observait."*

Pour comprendre sa surprise, il faut rappeler la façon dont les biologistes imaginent le fonctionnement de la machinerie génétique. Sur l'ADN, cette longue molécule constituée d'une succession inintelligible de 3 milliards de lettres, émergent, de-ci de-là, quelques phrases lisibles : ce sont les gènes, soit des séquences contenant les instructions qui, une fois transcrites sur de petits filaments mobiles – les ARN messagers – permettent de construire, brique par brique, des protéines spécifiques. Et pour que la construction se déroule bien, le début et la fin de chacune de ces séquences codantes sont signalés par des codes de trois lettres, l'équivalent d'une majuscule et du point dans une phrase littéraire.

Sauf que, comme le constate Xavier Roucou, la phrase génétique codant pour la protéine du prion en cache une autre, complètement différente. Un peu comme dans cette suite de lettres, correspondant à un ARN messager imaginaire : "ftsgjaimelespoirestlaokhqj". On y décèle une séquence codante principale, "j-aime-les-poires". Mais il suffit de décaler le cadre de lecture de quelques lettres pour découvrir un second message : "l-espoir-est-la".

Une simple bizarrerie ? Xavier Roucou et son équipe décident de passer au peigne fin tous les ARN messagers. A l'aide de logiciels, ils dénichent des dizaines de milliers de nouvelles séquences codantes potentielles, cachées au cœur des codes connus, ou situées de part et d'autre. *"Dans tous les ARN messagers, il existe d'autres signaux initiateurs, en amont ou en aval des signaux principaux,* décrit le chercheur. *On pensait que ces signaux étaient ignorés. Or ce n'est pas le cas. En moyenne, on a trouvé que chaque ARN messager pouvait être 'lu' de 3,8 façons différentes, donnant lieu à autant de protéines qui coexistent dans la cellule."*

Voici comment l'ADN

Une séquence codante…

L'ADN est transcrit en ARN messager, constitué d'une séquence principale, codant pour la production d'une seule protéine, flanquée de deux régions non codantes. Un triplet de nucléotides AUG initie la traduction par les ribosomes. Chaque triplet code pour un acide aminé, et l'enchaînement de ces acides constitue la protéine finale.



Brin d'ARN messager

… peut en cacher d'autres

La lecture de la séquence principale peut être décalée de quelques nucléotides. Un nouveau cadre de lecture apparaît alors, offrant une succession inédite de triplets qui codent pour des protéines alternatives (protéine fantôme n°1) sans lien avec la protéine de référence.



De plus, les portions considérées comme non codantes de l'ARN messager ne le sont finalement pas. Elles contiennent des séquences permettant la traduction par les ribosomes. Ces régions de faible longueur coderaient pour des protéines de petite taille (protéine fantôme n°2).



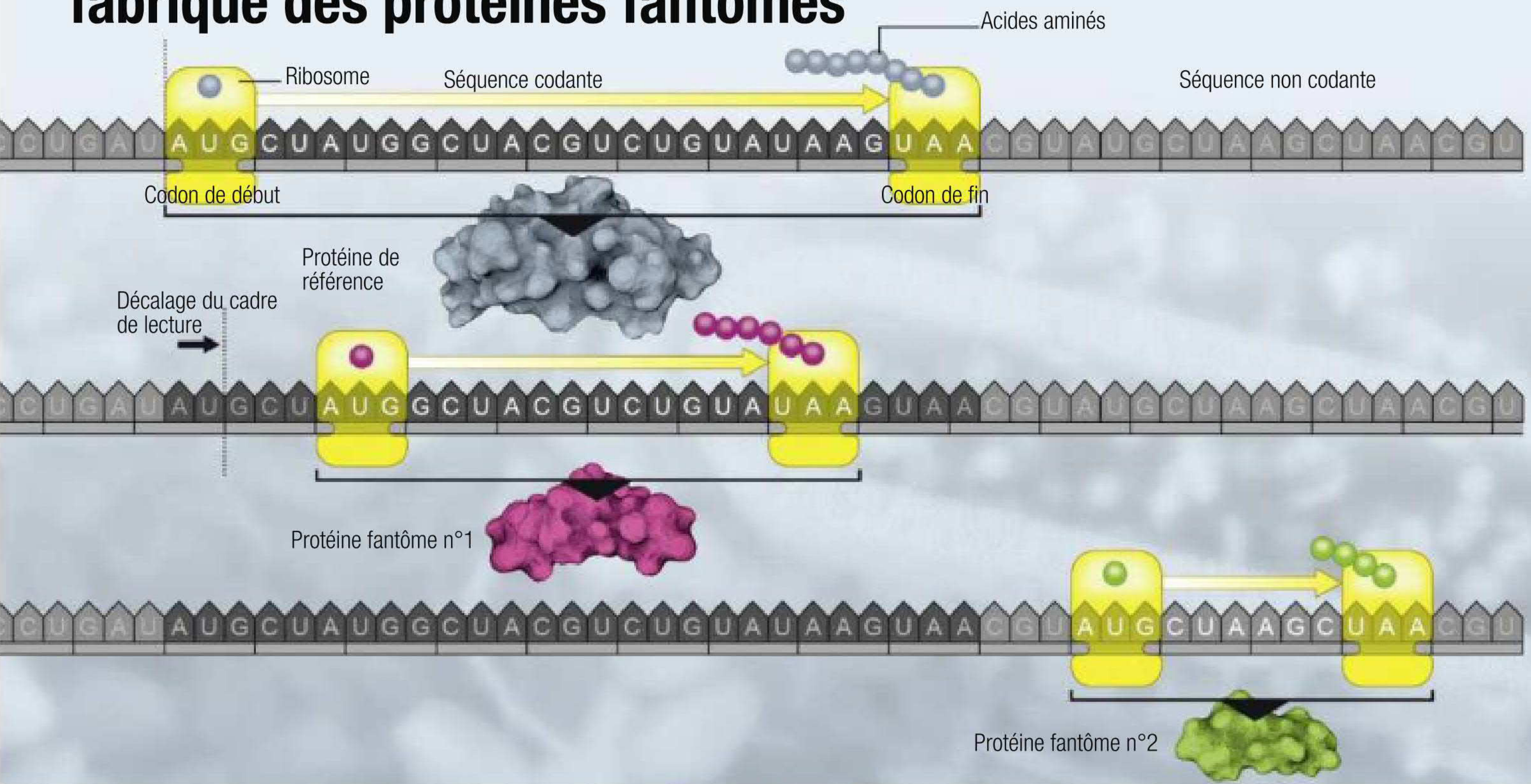


DR - BRUNO BOURGEOIS



XAVIER **ROUCOU**
Biochimiste à l'université de Sherbrooke, au Canada

Si on est passé à côté, c'est surtout parce qu'on s'est enfermé dans des dogmes



Pour vérifier que ces séquences latentes étaient bel et bien traduites, l'équipe se met à rechercher la présence des protéines correspondantes dans plusieurs types de cellules, par spectrométrie de masse, une technique qui permet de fragmenter les protéines et d'en déterminer la composition. Bingo! Ils en pêchent 1 259, inconnues au bataillon.

PROTÉINES NON RÉPERTORIÉES

Ce résultat, publié en 2013, est dérangeant. Tellement, en fait, que le chercheur peine à convaincre ses confrères. Mais en parallèle, dans d'autres laboratoires, les preuves de l'existence de cet univers caché s'accumulent.

Jonathan Weissman, à l'université de Californie, est aux premières loges. Il a mis au point, en 2009, une technique qui permet de "capturer" le moment clé de la traduction de l'ARN messager en protéine, au sein de ces petites usines flottantes que sont les ribosomes. Et en 2011, grâce à ce "profilage ribosomal", son équipe fait un constat qui va dans le même sens: dans des cellules souches de souris, plus de la moitié des sites où s'attachent les ribosomes ne correspondent pas aux sites d'initiation connus sur les ARN répertoriés.

De son côté, à l'hôpital pour enfants de Boston, aux Etats-Unis, Judith Steen voit elle aussi des fantômes. En 2014, la neurobiologiste décide de faire l'inventaire de toutes les protéines présentes dans des neurones de souris. Surprise, 80 % des fragments obtenus par spectrométrie sont introuvables dans les bases de données! *"Nous avons décidé de séquencer tous les ARN des neurones, pour comprendre d'où venaient ces protéines inconnues"*, explique la chercheuse. Elle parvient alors à faire correspondre ces inconnues aux "messagers" qui leur ont donné naissance. Parmi les 250 nouvelles protéines identifiées, certaines sont issues de séquences codantes alternatives présentes dans les ARN messagers – ce qui confirme la découverte de Roucou et les observations de Weissman.

Mais Judith Steen met aussi le doigt sur une seconde fabrique de fantômes: beaucoup de ces protéines inattendues proviennent de séquences codantes situées dans des régions… non codantes de l'ADN!

Souvenez-vous: en théorie, seule une petite partie du génome code pour des pro-

Dates clés

1866 : Mendel publie ses lois sur l'hérédité. **1945 :** Avery montre que l'ADN est le support de l'hérédité. **1953 :** Crick et Watson découvrent la structure en double hélice de l'ADN. **1961 :** Nirenberg et son équipe décryptent le code génétique, qui permet de passer de l'ADN aux protéines. **2001 :** Le premier génome humain est séquencé.

téines. Le reste, longtemps appelé “ADN poubelle”, a été mis de côté, puisque non codant. *“Une des grosses surprises des années 2000, c’est lorsqu’on s’est aperçu que la grande majorité du génome était en fait transcrit, c’est-à-dire copié en ARN”*, rappelle John Rinn, qui dirige un laboratoire de recherche sur l’ARN à l’université Harvard. Ces petits filaments mobiles issus de l’ADN poubelle sont soupçonnés de jouer un rôle dans l’expression de certains gènes ou dans l’activité des protéines dans la cellule. Mais, comme le souligne John Rinn, *“ces ARN sont appelés ‘longs ARN non codants’, car ils ne servent pas, en théorie, à fabriquer des protéines”*.

Faux, indique le résultat de Judith Steen. Et ce n’est pas le seul.

300 000 FANTÔMES !

Depuis trois ou quatre ans, grâce au séquençage rapide et à des spectromètres de masse plus efficaces, les chercheurs ne cessent en fait de découvrir de petites protéines (ou peptides), codées justement par ces ARN considérés comme non codants. *“Il y avait plusieurs exemples depuis la fin des années 1990, mais ils étaient considérés comme des exceptions”*, relate Serge Plaza, chercheur au Centre de biologie du développement de Toulouse, dont l’équipe a découvert en 2010 de tels peptides chez la drosophile. D’ailleurs, Jonathan Weissman a lui aussi constaté que de très nombreux ARN considérés comme non codants sont en fait associés aux ribosomes… et donc, potentiellement traduits !

“Tous les chercheurs ont l’air d’être surpris, mais je ne comprends pas pourquoi. Au sein des milliers de longs ARN non codants décrits, il y a forcément ce qu’on appelle de petits cadres de lecture, dont certains peuvent coder pour des petites protéines. Nous autres, spécialistes de l’ARN, nous le savons, nous l’avons dit, et personne ne nous a écoutés”, ironise John Rinn.

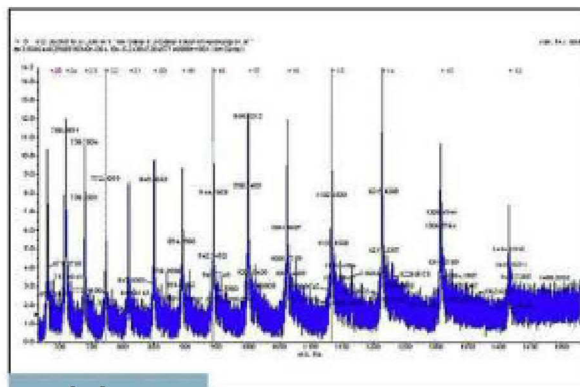
Toujours est-il que le bilan donne aujourd’hui le vertige. Dans une toute récente étude plus exhaustive, car portant sur l’intégralité du génome, Xavier Roucou vient de finalement revoir à la hausse le nombre de ces acteurs imprévus du grand jeu de la vie : *“Selon nos estimations, basées sur des modèles informatiques, il pourrait y avoir jusqu’à 300 000 protéines fantômes”*, conclut-il, sans pouvoir donner un chiffre précis.

Mais enfin, comment a-t-on pu passer à côté de quelque chose d’aussi énorme ?

“Après le séquençage du génome humain, il y a quinze ans, il y avait tellement de données à analyser que les bio-informaticiens ont répertorié une seule séquence codante par gène, la plus longue”, explique Xavier Roucou. De quoi obtenir de belles bases de données répertoriant tous les gènes et les protéines possible. *“Ces algorithmes ont été mis en place pour discriminer ce qui était codant du bruit de fond”*, résume Serge Plaza. On a donc ignoré, volontairement et de façon arbitraire, beaucoup de majuscules, de points et de petites phrases potentielles. Puis on a oublié ces simplifications…

Protéines fantômes : trois techniques rivalisent pour les identifier

C’est grâce à de nouvelles techniques d’investigation cellulaire, bien plus fines et précises, que les protéines fantômes peuvent être détectées. Et cela, de trois façons différentes.



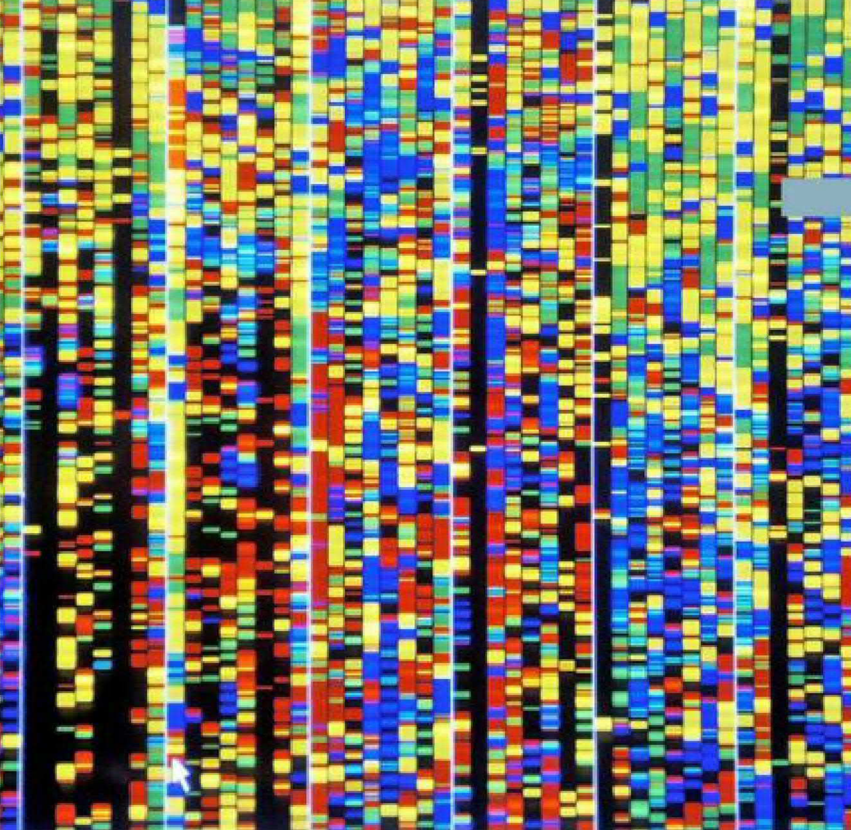
REPÉRÉES GRÂCE AU SPECTROMÈTRE

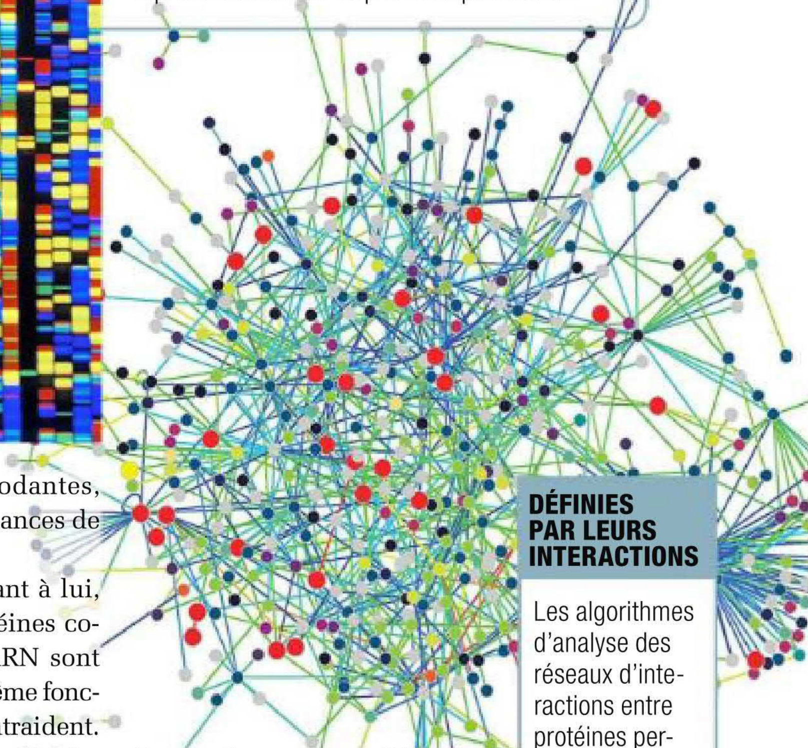
Les nouveaux spectromètres permettent de déceler plus facilement les petites protéines, qui se noyaient dans le bruit de fond. Ici, chaque pic représente une protéine.

Oui, mais pourquoi la présence matérielle de ces invités surprises n’a-t-elle pas été détectée plus tôt ? Serge Plaza souligne les limites des techniques de spectrométrie de masse : *“Les petits peptides ont toujours été difficiles à détecter, car ils sont noyés dans les produits de dégradation”*, explique-t-il. Xavier Roucou y voit aussi les conséquences d’une sorte d’aveuglement qui ne doit rien au hasard : *“En fait, en spectrométrie de masse, on rejette habituellement 50 % des données puisqu’elles ne correspondent à rien de connu.”* Selon lui, il aurait suffi de chercher les fantômes pour les trouver. *“Si on est passé à côté, c’est surtout parce qu’on s’est enfermé dans des dogmes et qu’on ne s’est pas suffisamment interrogé dessus.”*

Reste la question centrale : à quoi servent ces protéines oubliées ? Sont-elles toutes fonctionnelles ? Jouent-elles des rôles cruciaux ou secondaires ? Il est encore trop tôt

UC SAN DIEGO - P.LANDMANN/SPL/COSMOS - BJORN TITZ ET AL.





ANALYSÉES PAR SÉQUENÇAGE HAUT DÉBIT

Le séquençage à haut débit fournit un portrait détaillé de l'ADN et des ARN transcrits. "Scanner" ces données à l'aide de logiciels permet alors d'identifier tous les "cadres de lecture" du génome, représentant autant de protéines potentielles.

DÉFINIES PAR LEURS INTERACTIONS

Les algorithmes d'analyse des réseaux d'interactions entre protéines permettent de déterminer leur fonction, en décelant leurs partenaires de jeu biologiques.

pour le dire. *"Mais la porte est ouverte"*, s'enthousiasme Serge Plaza.

Ce qui est sûr, c'est qu'il ne s'agit pas que de "bruit", ou d'erreurs, comme certains ont pu l'avancer. A preuve, les petites protéines de drosophile découvertes par Serge Plaza, qui jouent un rôle dans le développement de l'insecte. Ou celles répertoriées par Judith Steen, dont la quantité varie en fonction de l'activité des neurones, ce qui suggère qu'elles ont une fonction biologique. Ou encore celle mise au jour en 2015 par Eric Olson, de l'université du Texas Southwestern, nommée myoréguline et située dans un ARN "non codant", qui joue un rôle majeur dans la régulation de la contraction musculaire.

STRESS DE LA CELLULE

Judith Steen ne l'a pas encore prouvé, mais elle pense que ces protéines alternatives sont surtout produites lorsque la cellule est soumise à un stress. Comme si l'organisme puisait dans ses stocks de nouvelles séquences codantes, pour avoir plus de chances de s'adapter.

Xavier Roucou, quant à lui, imagine que les protéines codées par le même ARN sont impliquées dans la même fonction biologique et s'entraident. *"On commence à avoir des preuves d'interactions fonctionnelles"*, lâche-t-il, prudent.

Quoi qu'il en soit, on ne peut plus continuer à ignorer ce monde parallèle. *"Lorsqu'on bloque un gène à des fins de recherche, ce sont potentiellement 3 ou 4 protéines qu'on supprime,* indique-t-il. *Et dans certains cas, les protéines alternatives sont même plus abondantes que la protéine de référence !"*

Reste à convaincre les biologistes qui, dans leur majorité, ferment encore les yeux. *"Nous avons simplifié la biologie à outrance. Pour chaque portion du génome, il faut s'intéresser aux rôles de l'ADN, de l'ARN et des éventuelles protéines de toute taille"*, affirme John Rinn, arguant que la spécialisation des biologistes dans l'un ou l'autre de ces éléments a nui à leur lucidité, brouillant la vision d'ensemble.

Mais il ne faut pas voir tout cela comme un constat d'échec. Plutôt comme le début d'une nouvelle ère. *"On découvre un degré supplémentaire de complexité du génome. C'est peut-être cette complexité qui permettra d'expliquer la diversité du vivant, que l'on n'arrive pas à appréhender en regardant uniquement le génome connu"*, avance Serge Plaza. Et d'ajouter que c'est aussi cela, la recherche : être confronté à des concepts qui s'effondrent le jour où l'on découvre que la réalité est plus complexe que prévu.

En attendant, la révolution a commencé. Des milliers de protéines, aujourd'hui, ne sont déjà plus des fantômes.



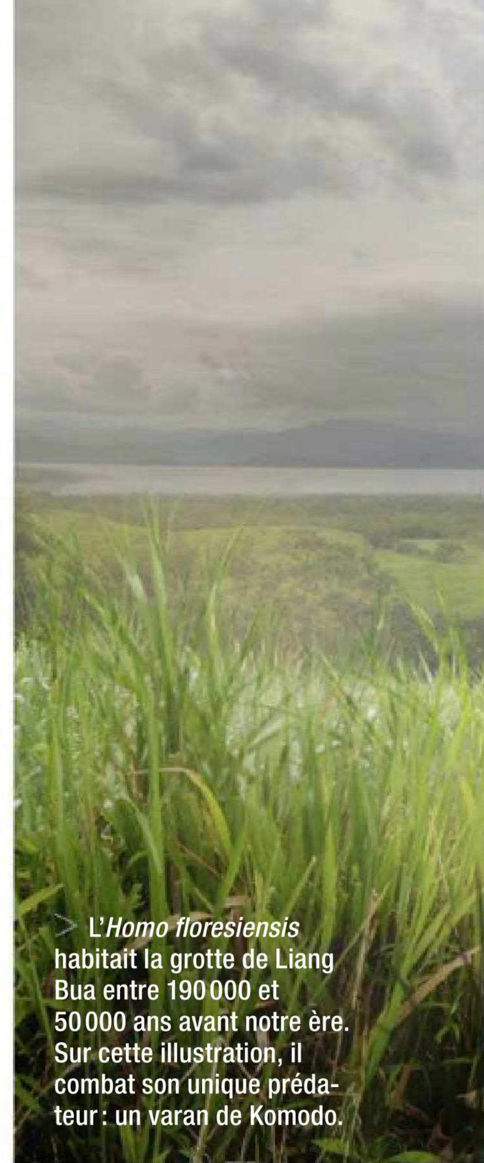
EN SAVOIR PLUS

A lire : les publications mentionnées dans l'article.

science-et-vie.com

Ile de Flores
Ici régnait le peuple nain

Le débat est clos : les fossiles retrouvés sur l'île indonésienne appartiennent bien à une nouvelle espèce d'*Homo*. Une espèce naine, qui défie l'imaginaire. **Thomas Cavaillé-Fol** a suivi ses traces.



> L'*Homo floresiensis* habitait la grotte de Liang Bua entre 190 000 et 50 000 ans avant notre ère. Sur cette illustration, il combat son unique prédateur : un varan de Komodo.

Sur la petite île de Flores, en Indonésie, se trouve une grotte appelée Liang Bua. Ce n'est pas une de ces grottes humides et obscures, auxquelles on accède par un boyau tortueux. Non, Liang Bua est spacieuse, et même élégamment éclairée grâce à son ouverture béante. C'est peut-être pour ces qualités qu'elle était habitée, entre 50 000 et 190 000 ans avant notre ère, par de petits êtres bien étranges. C'était un trou de Hobbit, aurait décrit Tolkien. C'est, en tout cas, le dernier refuge connu d'un peuple d'homininés qui a régné sur l'île pendant plus de 600 000 ans. Un "peuple nain", viennent de démontrer les paléoanthropologues, après plus de dix ans d'enquête.

Barbu et râblé, armé d'une hache, travaillant les métaux dans d'immenses mines aux éclats d'or, la figure du nain tel que nous l'imaginons aujourd'hui nous vient principalement du *Blanche Neige* de Walt Disney et, avant ce film, de la mythologie scandinave – dont s'est justement inspiré Tolkien dans ses romans. Or, la véritable histoire du petit peuple de Flores n'a rien à envier à ces légendes…

Attention, c'est bien de tout un peuple qu'il est question ici. Notre espèce abrite en son sein des "personnes de petite taille" (1,30 m de moyenne environ), dont la croissance a été ralentie par des causes génétiques ou des maladies. *"Mais là, nous parlons d'une espèce différente de la nôtre, une espèce véritablement naine, qui présente des caractères morphologiques qui lui sont propres, ce qui la rend unique : l'*Homo floresiensis, expose Gerrit van den Bergh, paléontologue de l'université de Wollongong, en Australie. *De la dizaine de fossiles découverts à Liang Bua, le squelette adulte le plus complet, qui est aussi le plus grand, ne mesure qu'un peu plus de 1 m."* La taille d'un garçon de 4 ans…

UN AIR DE LÉGENDE

Lors de cette découverte, en 2004, l'histoire sonnait un peu trop comme une légende pour ne pas provoquer de scepticisme – d'autant plus que la trilogie de Tolkien sortait alors sur les écrans de cinéma…

Face à ceux qui y voyaient une nouvelle espèce (principalement des paléoanthropologues), d'autres (principalement des experts en médecine) suspectaient "l'homme de Flores" de n'être qu'un *Homo sapiens* souffreteux, atteint de microcéphalie ou du syndrome de

Down. *“Son cerveau a été mis en cause, il était trop petit. On l’estimait à 385 cm³, proche de celui du chimpanzé. Comment aurait-il pu fabriquer les outils retrouvés, datant de la même époque?* relate Antoine Balzeau, paléoanthropologue au musée de l’Homme. *Mais nous avons étudié son crâne et démontré qu’il ne ressemblait pas du tout à celui d’un* Sapiens*, même atteint des maladies qu’on lui prêtait. Il tenait plus d’un* Erectus.*”*

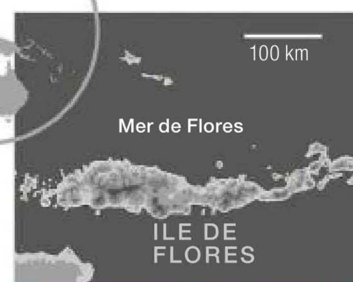
Le débat s’est arrêté cet été, suite aux analyses d’un fragment de mandibule et de six dents découverts dans l’ancien lit d’une rivière de l’île. Ces fossiles, qui proviennent d’au moins trois individus différents, sont similaires en taille et morphologiquement très proches de ceux des nains de Liang Bua. Sauf qu’ils datent de… 700 000 ans! De quoi régler la question de la parenté avec *Sapiens*: *Floresiensis* était déjà petit bien avant que notre espèce ne vienne au monde. De quoi aussi asseoir le peuple nain dans sa légitimité: son règne sur Flores – et exclusivement sur cette île – a duré au minimum 600 000 ans, soit plus de deux fois le temps d’existence de l’humain moderne sur la Terre!

Comment est née une telle espèce? Quel fabuleux mécanisme de l’évolution est venu rivaliser avec notre imagination, et même la contredire? Car, contrairement à ce que colporte la mythologie nordique,



DR





Repères

Flores est une île d’Indonésie d’un peu plus de 15 000 km², volcanique, colonisée par notre espèce il y a environ 50 000 ans, et qui compte aujourd’hui près de 2 millions d’âmes. En 2003, des chercheurs y déterrent des fossiles d’hominidés nains. Le début d’une controverse sur leur origine : est-ce une nouvelle espèce ?

les nains ne sont pas issus des larves qui rongèrent le corps d'Ymir, ce géant qu'Odin tua afin de créer la Terre à partir de sa chair. Contrairement aux écrits de Tolkien, le peuple nain appartient bien à notre genre – n'en déplaise aux Elfes, qui les détestent mais qui en deviennent les cousins. Ce serait en fait Flores, le vrai créateur. Comme de nombreux animaux, *Homo floresiensis* n'aurait pas échappé à "la loi de l'île".

"NANISME INSULAIRE"

"Ici, la naissance de l'espèce aurait été provoquée par le phénomène de 'nanisme insulaire', souligne Antoine Balzeau. *C'est la première fois qu'il est visible sur la lignée humaine, à l'échelle de l'espèce."*

Ce phénomène est connu et débattu depuis longtemps : sur une île, les gros animaux tendent à devenir plus petits, et les petits, plus gros. L'un des cas les plus impressionnants de cet étrange effet de l'évolution concerne le cerf rouge de l'île de Jersey, qui en seulement 6 000 ans aurait réduit sa corpulence par six. Selon l'hypothèse controversée du biogéographe américain Mark Lomolino, les animaux auraient tous tendance à converger vers une taille unique et optimale, proche de celle d'un chien. *"Mais cette 'loi de l'île' dépend de nombreux facteurs et ne s'applique pas partout"*, prévient la chercheuse en ethnozoologie Alexandra van der Geer, de l'université d'Athènes, en Grèce.

Force est de constater que Flores n'est pas n'importe quelle île… Un grand pouvoir y était à l'œuvre. Car la faune y est devenue des plus fantastiques : des rats de la taille d'un

Un corps forgé par plus de 600 000 ans de vie insulaire

La "loi de l'île" a fortement impacté le corps de *Floresiensis* : en plus de sa taille réduite, ce petit peuple possédait d'autres attributs morphologiques propres à son espèce.

Un crâne minuscule

De seulement 426 cm^3, il fait la taille de celui d'un chimpanzé. Mais sa forme ainsi que l'épaisseur des os ressemblent clairement à ceux du crâne d'*Erectus*.

Une puissante mâchoire

Proportionnellement, ses dents sont aussi petites que celles d'un humain moderne. Sa mâchoire semble pourtant adaptée à une forte mastication, et elle ne possède pas le menton caractéristique de *Sapiens*.

Une petite taille

L'*Homo erectus* de Java faisait environ 165 cm. Sa taille aurait donc été réduite de plus d'un tiers : le plus grand des fossiles de *Floresiensis* mesure 106 cm.

De longs bras primitifs

Sa clavicule courte, ses longs bras et ses os du poignet rappellent ceux des premiers *Homo*. L'homme de Flores devait être meilleur grimpeur que lanceur.

De grands pieds

Clairement, le nain était bipède, mais avec des pieds plats et longs comme les trois quarts de son fémur : ce n'était ni un bon marcheur ni un bon coureur.

chat, des sortes d'éléphants nains (les stégodons), et des lézards de près de 3 m de longueur, les dragons de Komodo.

"Flores est une île relativement petite, décrit Alexandra van der Geer. *Elle n'est pas très éloignée de ses voisines occidentales, mais un fort courant nord-sud empêche toute colonisation par ce biais. Les espèces sont sûrement arrivées via Sulawesi, au nord, qui est, elle, distante de plus de 200 km ! Résultat, la faune se limite aux quelques animaux qui ont réussi la traversée."* Et une fois sur l'île, chaque espèce a eu le temps de trouver sa place dans l'écosystème, car le flux de nouveaux arrivants, proies ou prédateurs, était extrêmement faible.

"Les gros mammifères herbivores, comme les stégodons, font alors face à des ressources limitées, continue la chercheuse. *Et leur grande taille n'est plus un avantage car il n'y a pas de prédateurs ! En plus de la sélection naturelle, il se produit au fil des générations une modification de leur développement : celui-ci s'arrête plus tôt, ou il s'effectue plus lentement. Cela peut avoir un effet sur l'âge de la maturité sexuelle et donc la rapidité de reproduction. Chez les petites espèces comme les rongeurs, l'effet contraire se produit : ils n'ont plus à se cacher et peuvent grossir, car être petit constitue un désavantage en terme de perte de chaleur."*

UN GROUPE DE 7 000 INDIVIDUS

Notre lointain cousin n'a pas échappé à ces tensions évolutives. "Homo floresiensis *nous montre à quel point l'homme est soumis à son environnement"*, relève Antoine Balzeau.

A l'opposé de la vision du nain qui ne quitte que rarement ses mines, voilà que celui-ci serait donc le pur produit de la vie au grand air ! Selon les estimations, une île comme Flores pourrait accueillir et nourrir entre 570 et 13 000 chasseurs-cueilleurs de taille normale. Or, avec sa réduction de taille, *Floresiensis* aurait eu besoin d'environ deux fois moins d'apports énergétiques qu'un *Homo erectus*, soupçonné d'être son grand ancêtre. Les nains auraient donc pu se compter par milliers sur Flores, en tout cas atteindre les 7 000 individus nécessaires, selon le chercheur en conservation et génétique David Reed, à la survie d'une population pendant plus de 40 générations.

C'est son cerveau, de seulement 426 cm^3, qui a le plus été touché par cette réduction. *"Il est vrai que le cerveau d'*Homo floresiensis *est bien plus petit que ce qu'on attendrait d'une réduction proportionnelle de taille. Mais en même temps, cet organe est très gourmand en énergie, donc il semble logique qu'il soit le plus touché en cas de manque de ressources : ça s'est déjà vu sur des hippopotames"*, expose Gerrit van den Bergh.

Ce qui n'a apparemment pas trop altéré ses facultés mentales. Car même si le nain ne semble pas avoir inventé le feu, il fabriquait des outils de pierre pour chasser et découper des stégodons. Par précaution – ou par lâcheté, dirait un Elfe –, il pistait préférentiellement les petits. Les Elfes souligneraient aussi que le nain n'a pas fait de progrès en termes d'outillage pendant des centaines de milliers d'années : les outils retrouvés dans la grotte de Liang Bua ressemblent fortement à d'autres, datés de 1 million d'années, et dont le fabricant, toujours inconnu, est suspecté d'être l'ancêtre de grande taille de *Floresiensis*. C'est peut-être qu'il partage avec sa légende le respect



Une faune fantastique
Sur Flores, certains animaux ont rapetissé tandis que d'autres ont carrément doublé de volume. Ces espèces, qui ont cohabité avec le nain, témoignent de l'impact de l'isolement sur le vivant.

des traditions et l'amour du savoir-faire ancestral.

"La 'loi de l'île' peut aussi modifier le comportement d'une espèce et la rendre plus docile, par exemple, ou même transformer sa morphologie", reprend Alexandra van der Geer. Ce qui pourrait expliquer cette drôle d'apparence qu'avait *Floresiensis*. Ses bras étaient plutôt longs et sa clavicule très petite, ce qui, selon Susan Larson, chercheuse en biologie évolutive de l'université Stony Brook à New York, en faisait un piètre lanceur. Ses pieds étaient très grands eux aussi, comparativement à ses courtes jambes, ce qui n'en faisait ni un bon coureur, ni un bon marcheur. Mais quelle importance sur une île avec peu de prédateurs? Pour Karen Baab, anthropologue à l'université Midwestern, ces particularités anatomiques pourraient être liées au retour de l'escalade dans son mode de vie.

Reste à savoir comment l'ancêtre du nain a pu atteindre l'île. *"L'hypothèse principale est qu'une population d'*Erec*tus d'une taille 'normale', dont la présence est attestée en Indonésie, notamment sur l'île de Java, il y a 1,2 million d'années, aurait été emportée sur Flores par un tsunami"*, expose Adam Brumm, archéologue de l'université de Griffith, en Australie. La région est sans conteste soumise à ces événements de grande ampleur. Et une étude de 2012 menée par Graeme Ruxton, professeur d'évolution et d'écologie à l'université de Saint-Andrews, en Grande-Bretagne, vient appuyer cette hypothèse: un groupe de 10 individus, *Erectus* ou *Sapiens*, mâles et femelles de tous âges, a 20 % de chances de créer avec succès une population d'au moins 500 personnes sur une île.

L'hypothèse *Habilis* ou australopithèque

Et si l'ancêtre du nain n'était pas un *Homo erectus* mais un de ses lointains ancêtres, un *Homo habilis* voire un australopithèque? Car certains chercheurs reconnaissent dans ses pieds ou son crâne des caractères très primitifs. Or, dans ce cas, *Floresiensis* ne serait pas issu de la "loi de l'île": les australopithèques avaient à peu près la même taille (1,06 m) pour un cerveau de 450 cm³. Ou celle-ci aurait été moins forte: *Habilis* faisait environ 1,20 m pour 614 cm³ de capacité crânienne. Mais ce voyage serait pour le moins inattendu: *"Ces hominidés n'ont jamais été découverts hors d'Afrique,* assure Antoine Balzeau. *Cette hypothèse pose donc plus de questions qu'elle n'apporte de réponses."*

COLONISATION "NATURELLE"

*"Une colonisation comme celle d'*Homo erectus *sur Flores peut donc être le fruit d'événements naturels, par des individus sans capacités de navigation"*, précisent les auteurs de l'étude. Moins de 500 000 ans après leur arrivée sur l'île, les colons avaient déjà rapetissé.

Telle semble donc la véritable histoire des nains de l'île de Flores. Ne vaut-elle pas la légende? *"C'est une de ces rares découvertes qui chamboulent notre vision de l'homme"*, assure Antoine Balzeau. *"L'*Homo floresiensis *s'ajoute aux espèces humaines, de Neandertal et de Denisova par exemple, qui ont cohabité longtemps avec nous. C'est un témoin de la complexité de notre grande famille."*

Et la fin de l'histoire? On perd la trace du nain vers 50 000 ans avant notre ère, ce qui correspond à l'arrivée des hommes modernes en Indonésie. Liang Bua, fief du petit peuple pendant plus d'une centaine de milliers d'années, est alors conquise: des dents de *Sapiens*, datées de 46 000 ans, y ont été retrouvées. *"Les nains ont peut-être migré vers un autre endroit de l'île, mais pour moi, nos empreintes sont partout autour de leur disparition"*, confesse Adam Brumm.

Dans les livres, humains et nains ne font pas bon ménage. Au mieux ils s'évitent, et ne parviennent à s'unir qu'en cas de grande menace commune. Pour le petit peuple qui a vécu il y a bien longtemps sur cette île mystérieuse peuplée de créatures fantastiques, la réalité a sans doute été beaucoup plus tragique.





EN SAVOIR PLUS

A consulter : les publications évoquées dans l'article.

science-et-vie.com

& Science techniques



BIOROBOTS
86



Dr WATSON
92



RÉALITÉ VIRTUELLE
98

SUNG-JIN PARK - GETTYIMAGES - P.ALLARD/REA - SHUTTERSTOCK

Mi-vivants, mi-machines

Les biorobots débarquent !

Mélanges inédits de cellules vivantes et de matériaux inertes, voici que de petites machines réalisent aujourd'hui la synthèse entre le biologique et la robotique. A la clé ? Des capacités inédites. **Simon Devos** nous présente cinq "biorobots" parmi les plus aboutis.

Ce sont les créatures modernes du Dr Frankenstein. Dans quelques laboratoires isolés, des équipes de chercheurs mettent au point une génération de robots d'un nouveau genre. Des hybrides mi-inertes mi-vivants, mélanges de matériaux synthétiques et de cellules organiques prélevées sur des animaux.

A première vue, travailler avec le vivant est pourtant un casse-tête pour un roboticien. Les cellules sont très fragiles ; elles peuvent se dégrader rapidement si leur environnement n'est pas strictement contrôlé. Température, accès aux nutriments ou salinité sont autant de paramètres que l'on ne peut laisser au hasard.

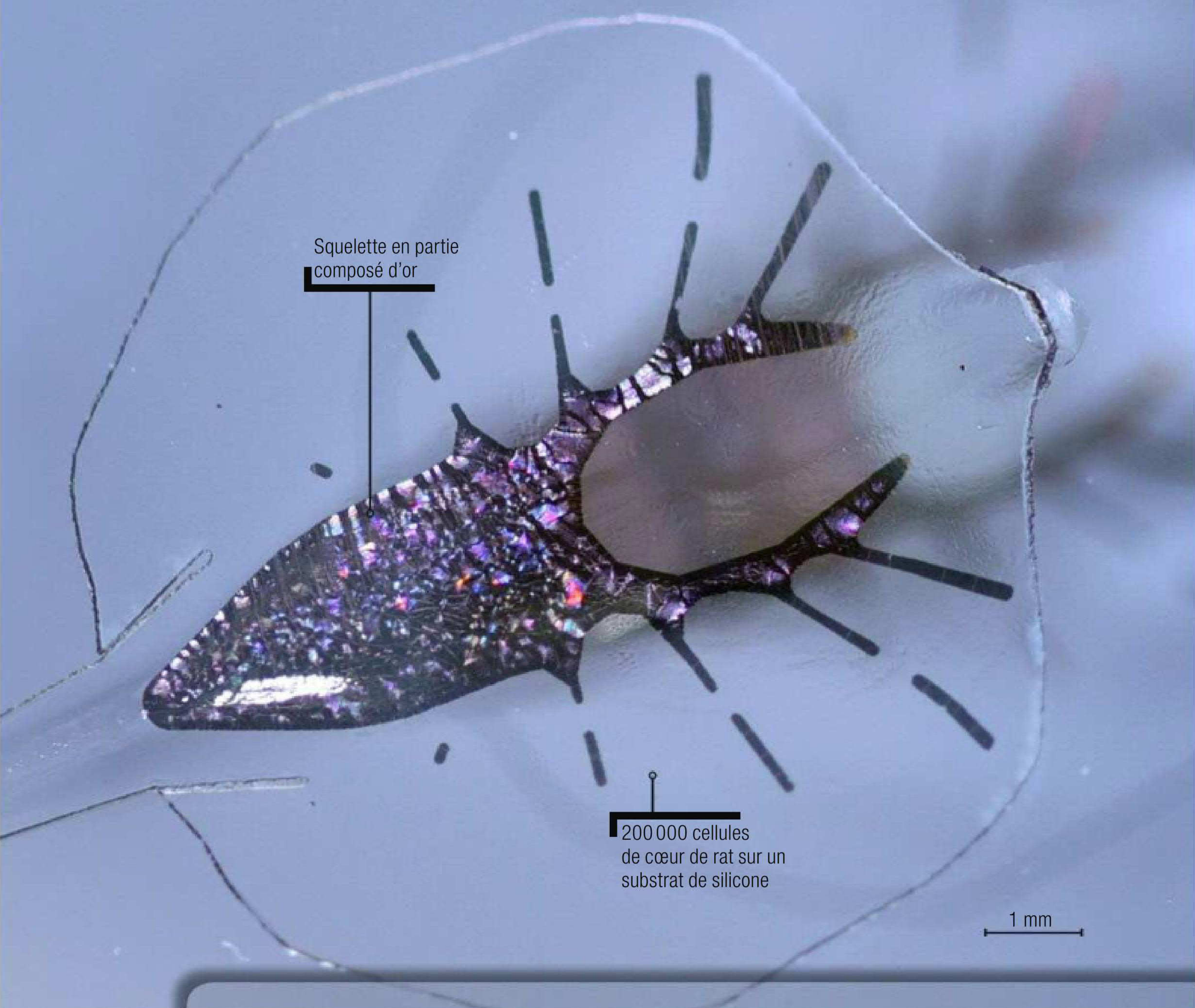
Mais, comme l'explique Victoria Webster, de l'université Case Western Reserve (Etats-Unis), ces inconvénients sont vite compensés par les avantages qu'apporte ce type de greffe : *"En robotique, nous essayons de plus en plus d'imiter les animaux, car ils sont parfaitement fonctionnels dans leur milieu, aquatique ou terrestre. L'utilisation de cellules organiques permettra sans conteste aux robots de se rapprocher un peu plus de leur modèle animal, notamment dans la fluidité des mouvements."*

Kit Parker, de l'université Harvard (Etats-Unis), va plus loin. Pour lui, le vivant pallie certaines faiblesses du synthétique : *"Les cellules vivantes sont d'excellents convertisseurs d'énergie. Il suffit de les plonger dans un environnement riche en glucose, et elles absorbent spontanément*

Contexte

La robotique s'inspire depuis longtemps du vivant. Mais les progrès en ingénierie tissulaire permettent désormais de produire des cellules vivantes à greffer sur une structure inerte que l'on peut stimuler à distance.

SUNG-JIN PARK



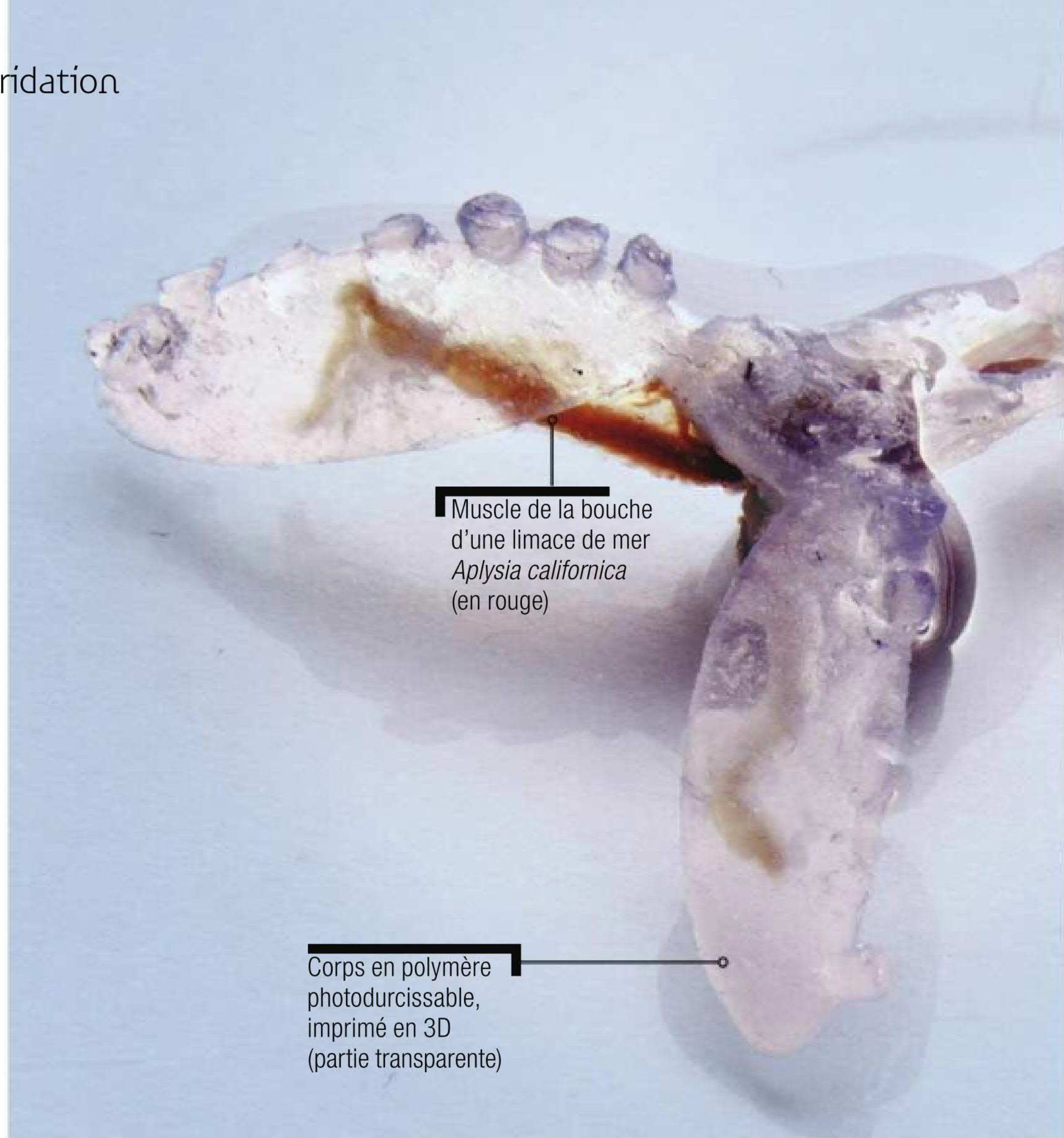
LA RAIE QUI SE PILOTE À LA LUMIÈRE

Ce biorobot transparent, reproduction à l'échelle 1/10 d'une raie, est un petit bijou de technologie. Placé dans l'eau, il peut atteindre une vitesse de 9 m par heure et changer de direction en activant ses ailettes. Plus impressionnant : cette raie miniature est pilotable. Sensible à la lumière bleue, elle peut suivre à la trace un faisceau lumineux, même à travers un parcours d'obstacles.

Les chercheurs ont tout d'abord construit un squelette rigide incluant une structure en or qui fait office de batterie. Vient ensuite le corps élastique en silicone, d'une forme similaire à celui de la raie. *"Puis, pour construire le tissu musculaire de notre raie autour de cette structure élastique, nous avons apposé, selon un motif bien précis, une fine couche d'une protéine qui attire les cellules : la fibronectine"*, développe Kit Parker (université Harvard). Environ 200 000 cellules de cœur de rat ont ensuite été ajoutées et se sont développées selon le motif dessiné, en forme d'ailettes de raie. Enfin, les cellules ont été volontairement infectées par un virus qui les a rendues sensibles à la lumière bleue. Grâce à cette technique, chaque groupe de cellules peut se contracter indépendamment des autres lorsqu'il reçoit de la lumière, et la raie est capable de suivre un faisceau lumineux.

ce dont elles ont besoin pour se recharger." Pas besoin de batterie pour les cellules, qui gagnent en simplicité par rapport aux robots traditionnels.

L'idée de combiner organique et synthétique trottait dans la tête des roboticiens depuis déjà quelque temps. Dès le début des années 2000, des chercheurs du MIT s'essayaient à bricoler des structures artificielles additionnées d'une paire de muscles de grenouille. Le Muscle-Actuated Robotic Fish, poisson robot finalisé en 2004, fut le tout premier hybride fonctionnel au monde. Maladroit, peu mobile, mais preuve que la combinaison était possible.



CELLULES EN CULTURE

Les travaux récents sur des "biorobots" plus variés et plus robustes bénéficient des progrès de l'ingénierie tissulaire. Ce domaine, développé au cours des années 2000, a pour but d'isoler des cellules du vivant afin de les cultiver en laboratoire, et éventuellement les modifier, avant de les réutiliser. La technique la plus courante pour créer des biorobots consiste à disposer les cellules directement sur un squelette synthétique, et à les forcer à se développer comme on le souhaite, en apposant par exemple une substance qui les attire au bon endroit. La première réalisation date de 2012 : une petite méduse à squelette en silicone, dotée de cellules issues d'un cœur de rat (voir encadré p. 92). Depuis, un étonnant bestiaire constitué de raie, de spermatozoïde, de tortue ou de chenille est apparu dans les laboratoires, imitant le vivant mieux que n'importe quel robot synthétique.

VICTORIA WEBSTER - TAHER SAIF/UNIVERSITY OF ILLINOIS

"Il s'agit d'une révolution totale, ose Taher Saif, chercheur en mécanique appliquée à l'université de l'Illinois (Etats-Unis). *Si ce domaine continue de se développer, et je suis très optimiste à ce sujet, les biorobots feront partie de notre quotidien d'ici quelques décennies."* Car ces biorobots sont plus que de simples exploits de laboratoire, les chercheurs leur imaginent déjà toutes sortes de tâches : dépolluer un environnement, déceler dans l'air ou l'eau la présence d'un composant dangereux, tester un médicament de façon très ciblée… C'est d'ailleurs dans l'univers médical que se dessinent les plus grandes ambitions. *"On pourrait par*

LE SPERMATOZOÏDE

Une tête imposante, un long flagelle très fin : pas de doute, ce biorobot est inspiré du spermatozoïde. D'une épaisseur de 7 micromètres (dix fois inférieure à celle d'un cheveu humain), ce minirobot est un nageur hors pair en milieu visqueux. Moins de cinq cellules de cœur de rat méthodiquement agencées à la jonction entre la tête et le flagelle lui permettent d'agiter ce dernier pour se mouvoir.
Mais la véritable spécificité de ce biorobot est son autonomie. Pour lui, pas besoin de stimulation électrique ni de guidage lumineux : une fois plongé dans un milieu sucré, il assi-

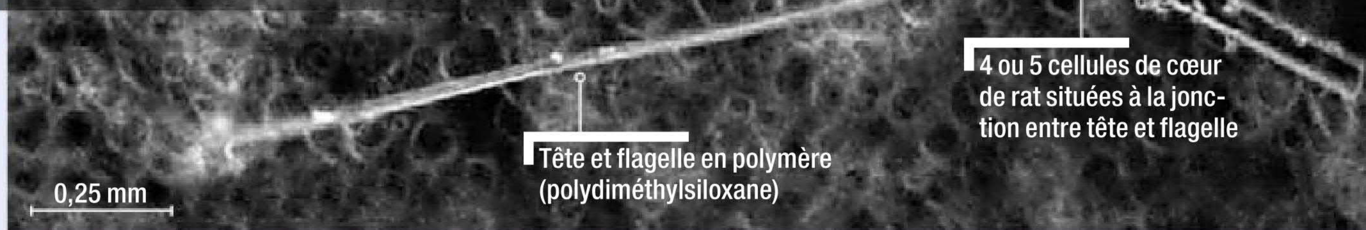
3 mm

LA TORTUE CHAMPIONNE DE LA SURVIE

Ce petit biorobot est de loin le plus robuste de cet improbable bestiaire. Il a même une santé de fer. Alors que ses congénères doivent tous être maintenus à une température bien précise pour que leurs cellules, fragiles, ne se dégradent pas, lui peut patauger dans une eau à 16 °C comme à 25 °C sans sourciller. Et selon ses créateurs, sa bonne constitution lui conférerait la capacité de s'adapter à d'autres environnements encore plus divers, qu'ils sont en train d'évaluer. La bestiole tient ce potentiel du matériau organique qui a servi de base à sa conception : un muscle entier provenant d'une limace de mer. *"Ces mollusques marins sont renommés pour leur grande robustesse, qui s'explique par le milieu dans lequel ils évoluent : au cours d'une même journée, ils peuvent faire face à de grandes variations de température ou de salinité de l'eau,* indique Victoria Webster, de l'université de Case Western Reserve, aux Etats-Unis. *Nous avons donc choisi un muscle spécifique issu de la bouche de cet animal et construit notre biorobot autour."*

Cette architecture musculaire étant similaire à celle d'une tortue de mer, les chercheurs ont souhaité imiter cet animal. Ils ont donc construit, à l'aide d'une imprimante 3D, un corps en polymère flexible sur mesure, adapté à la forme du muscle. Il en résulte un biorobot d'environ 3 cm de longueur, capable de ramper, par stimulation électrique, comme une petite tortue de mer sur la plage. Les chercheurs sont persuadés que la voie de la robustesse est primordiale dans ce domaine de recherche, car elle multiplie les applications envisageables. *"A terme, les biorobots pourront être recouverts d'une peau organique ou artificielle, qui leur permettra de fonctionner dans tous types d'environnement sans risquer de se dégrader,* ajoute Victoria Webster. *Nous pourrions ainsi concevoir des essaims de biorobots capables, par exemple, de dépolluer un environnement hostile."*

QUI SE DÉPLACE TOUT SEUL



mile naturellement le glucose qui l'entoure, et ses cellules se contractent toutes seules pour le propulser à près de 10 micromètres par seconde. *"Il s'agit d'une stimulation chimique : en présence de glucose, les cellules cardiaques se synchronisent d'elles-mêmes et permettent à notre robot de se mouvoir en autonomie pendant plusieurs jours"*, relate Taher Saif (université de l'Illinois). Pour l'instant, il n'est pas possible de contrôler le robot, qui se contente d'avancer en ligne droite. Mais à l'avenir, le chercheur compte bien l'enrichir d'ajouts révolutionnaires qui lui donneront encore plus d'autonomie : *"Quitte à travailler avec le vivant, pourquoi ne pas utiliser des neurones pour rendre ces biorobots réellement intelligents ? C'est la prochaine étape de nos recherches."* Avec ce processus, on peut espérer créer à l'avenir des armées entières de micro-biorobots intelligents qui se glisseront dans le corps humain pour traquer une tumeur, ou délivrer un médicament à un organe spécifique.

exemple envoyer sans danger ces biorobots à l'intérieur du corps humain pour délivrer un médicament à un organe spécifique, ou même combattre une tumeur", ajoute Taher Saif. Avantage par rapport aux techniques classiques : les biorobots s'adaptent plus facilement à différents environnements et tâches. D'autres spécialistes pensent pouvoir utiliser ces technologies pour créer des organes artificiels, à commencer par des cœurs.

Reste à savoir comment considérer ces nouvelles créations. Sont-elles vivantes ou inertes ? Des êtres ou des objets ? Organiques ou inorganiques ? *"Peut-être faudra-t-il envisager de revoir cette vieille opposition,* expose Florence Caeymaex, chercheuse en philosophie morale et politique au FNRS-université de Liège. *Peut-on toujours considérer un être partiellement organique comme un simple outil ?"* Une question d'autant plus légitime que certains chercheurs prévoient déjà de greffer des neurones sur leurs biorobots.

Vu leur potentiel dans un grand nombre de domaines, ces biorobots pourraient bien avoir débarqué parmi nous avant même que nous ayons réglé toutes ces questions. Les premiers sont d'ailleurs déjà là. A base de cellules de cœur de rats, de muscle de limace de mer ou de muscle squelettique de souris… Ils peuplent ces pages.



EN SAVOIR PLUS *

A voir : des vidéos des biorobots en action.
A lire : les articles et publications des chercheurs.

science-et-vie.com

Corps en hydrogel imprimé en 3D (en blanc)

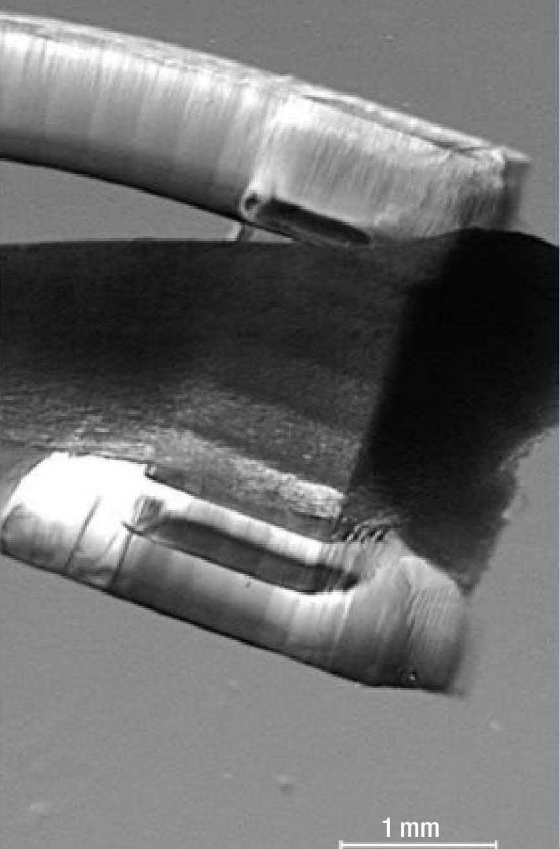
Cellules de muscle squelettique de souris (anneau sombre)

JANET SINN-HANLON ET RITU RAMAN/UNIVERSITY OF ILLINOIS - SUNG-JIN PARK

LE ROBOT QUI ONDULE AUSSI BIEN QU'UNE

Né en 2012, ce biorobot de quelques millimètres de diamètre est l'un des pionniers en la matière. Il est composé d'un squelette souple en silicone et d'un tissu musculaire d'environ 100 000 cellules de cœur de rat. Son anatomie lui permet d'imiter à la perfection le mouvement de la méduse.
Une fois installé entre deux électrodes plongées dans un fluide conducteur d'électricité, il répond aux stimulations en contractant simultanément toutes ses cellules musculaires. Ce qui a pour effet de déformer brusquement ses huit branches, et de le faire avancer. L'histoire a commencé en 2007 dans un grand aquarium. *"Une chose m'a frappé,* se souvient Kit Parker, *le mouvement de la méduse ressemblait en tout point à celui d'un cœur qui bat."* Avec son équipe, le spécialiste de biomécanique du cœur a alors recréé une structure en silicone de la même forme que le principal muscle moteur de la méduse : un disque central divisé en huit branches égales. Puis ils ont cultivé sur cette

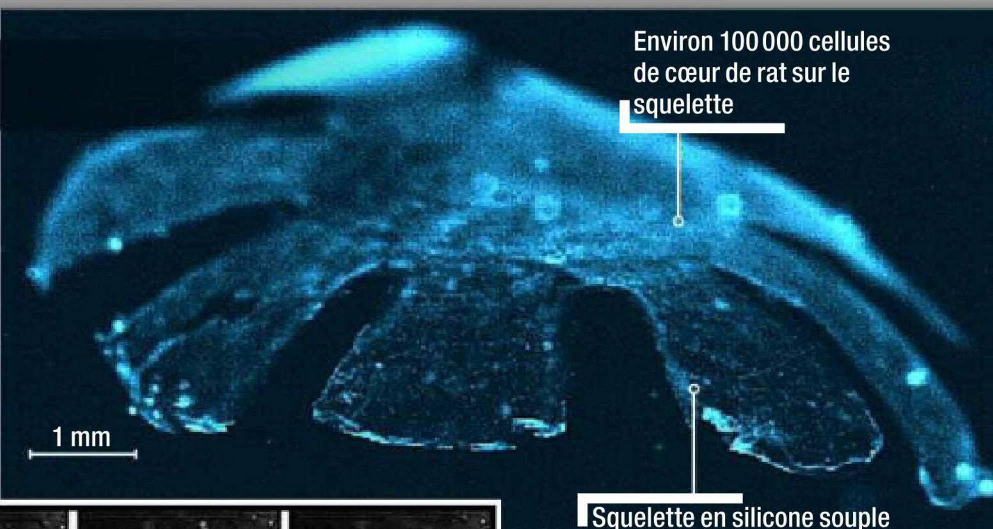
LA CHENILLE QUI MARCHE SUR DEUX PATTES



Ce petit bipède est le tout premier biorobot capable de se mouvoir sur terre. Il est constitué de deux éléments : un squelette bipède de 1 cm de longueur, composé d'hydrogel imprimé en 3D, et un petit anneau de cellules de muscle squelettique de souris qui encercle fermement celui-ci. Lorsque les cellules se contractent sous l'effet d'une stimulation électrique, elles déforment subitement la petite structure flexible, ce qui a pour effet de faire avancer la biomachine. *"Nous avons construit ce petit robot en nous inspirant de l'architecture d'une articulation : le muscle est attaché aux deux pattes du biorobot de la même manière que nos muscles sont attachés à l'os par le tendon,* précise Taher Saif, qui a participé aux recherches. *Ce n'est pas un hasard si nous avons choisi d'utiliser des cellules de muscle squelettique : elles nous permettent à la fois un meilleur contrôle de leur contraction, et sont également une voie intéressante pour l'avenir."* Celles-ci sont en effet plus polyvalentes que les cellules cardiaques, et il est assez facile de leur apprendre à réagir à certains signaux. Ainsi, récemment, les chercheurs ont légèrement modifié leur création afin de lui permettre de se contracter lorsqu'elle détecte un signal lumineux. A terme, ces biorobots pourraient être utilisés comme capteurs environnementaux autonomes, mobiles, et plus précis que nos capteurs électroniques. *"Un biorobot marcheur pourrait, par exemple, être entraîné à détecter une toxine spécifique, puis à se déplacer vers elle pour la neutraliser…"*

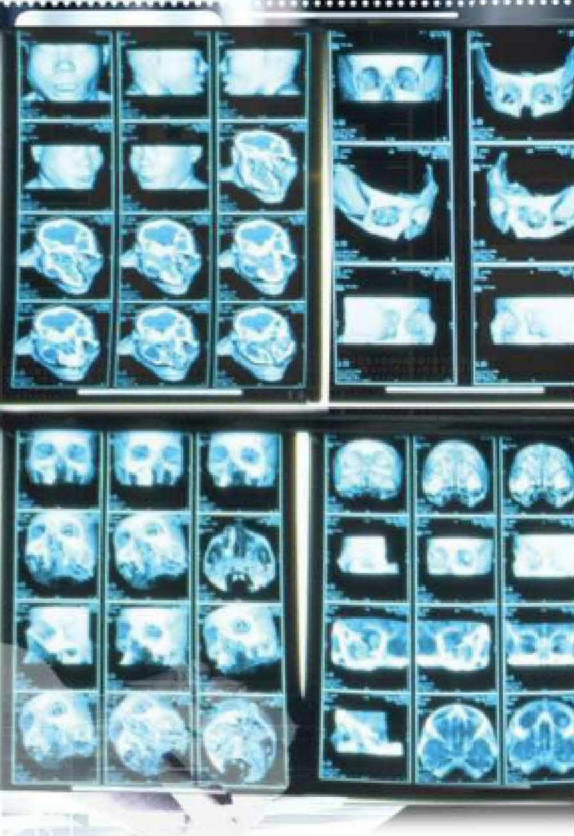
MÉDUSE

base leurs cellules de cœur de rat. *"Notre objectif n'était pas vraiment de fabriquer un robot mais d'étudier le fonctionnement et la biomécanique du cœur"*, insiste Kit Parker, qui envisage de fabriquer un cœur artificiel composé de cellules vivantes et de matériaux synthétiques.





< Par stimulation électrique, toutes les cellules musculaires se contractent, provoquant l'ondulation.



UNE FANTASTIQUE MACHINE À TRAITER LES DONNÉES MÉDICALES
Les algorithmes conçus par IBM sont capables d'analyser 40 millions de pages en 15 secondes : un véritable atout pour établir des diagnostics alors que le corpus médical explose.

Supercalculateur médical

Watson plus fort que Dr House

En dix minutes, un programme informatique a réussi à diagnostiquer un cancer qui tenait les médecins en échec ! **Hugo Leroux** nous dit comment Watson (c'est son nom) va puissamment révolutionner la médecine.

C'est une histoire digne d'un épisode de la série *Dr House*, le célèbre médecin spécialiste du diagnostic des cas *a priori* insolubles.

Elle commence en janvier 2015 à l'Institut de sciences médicales de l'université de Tokyo. L'équipe du professeur Arinobu Tojo s'arrache les cheveux sur le cas d'une patiente de 60 ans, chez laquelle a été diagnostiquée une leucémie myéloïde aiguë. Le problème ? La chimiothérapie prescrite ne fonctionne pas ; la patiente récupère très mal. Tout le diagnostic est à revoir.

Seule solution : replonger dans les tests génétiques de la malade, passer au crible chaque mutation (plus d'un millier !) au regard de la littérature scientifique (résultats d'essais cliniques, encyclopédies médicales…) et trouver une correspondance entre son cas et un cancer répertorié.

Mais avant de se lancer dans cet ingrat travail de bénédictin propre à mobiliser toute l'équipe pendant au moins deux semaines, les médecins se sont tournés vers Watson, leur nouvel assistant. Qui a trouvé la solution en dix minutes ! La leucémie n'était finalement que secondaire ; sa véritable cause était un syndrome myélodysplasique – une maladie rare touchant la moelle osseuse. Bingo ! Les médecins constatent l'adéquation entre ce diagnostic inattendu et les symptômes constatés, tandis que le traitement, adapté en conséquence, se révèle rapidement efficace.

Sauf que Watson n'est pas comme Dr House : un médecin misanthrope aux intuitions géniales. Il n'est pas non plus Dr Watson, le fidèle ami de Sherlock Holmes. Non. Watson est un superordinateur développé par IBM. Une machine unique en son genre, dotée d'un algorithme moulinant un maximum d'informations médicales pour établir, de façon statistique, le diagnostic le plus fiable possible. Et ça marche. En croisant le profil génétique →

Chronologie

1997 DeepBlue (IBM) bat le champion du monde d'échecs Gary Kasparov.
2011 Watson (IBM) bat 2 champions de *Jeopardy !*, un jeu télé de culture générale en langage naturel.
2016 AlphaGo (Google) bat un champion du jeu de go. Et Watson (IBM) surpasse des médecins en diagnostiquant une maladie rare.

V. SAMUEL D'APRÈS GETTYIMAGES
P.ALLARD/REA - SHUTTERSTOCK

de la patiente avec 20 millions de publications en oncologie, Watson a identifié ce cas très particulier de leucémie que nul n'avait envisagé. Et en un temps record ! Une première spectaculaire qui démontre tout le potentiel de l'intelligence artificielle (I.A.) en médecine.

Or, le plus surprenant, c'est que Watson n'a pas été inventé pour ce domaine précis. Son premier fait d'armes est d'avoir remporté en 2011… *Jeopardy !*, une sorte de *Questions pour un champion* américain, face à des humains. Un tour de force tant les questions, à la fois pointues et allusives, se prêtaient mal au premier degré supposé d'une intelligence artificielle.

70 À 80 % DE BONS DIAGNOSTICS

C'était compter sans les capacités du "système cognitif" de questions/réponses élaboré par IBM, qui permet de digérer en un clin d'œil des millions de pages de données non structurées – du texte en langage naturel, non pré-mâché pour un ordinateur –, puis de formuler les hypothèses les plus probables pour répondre aux questions posées. Une capacité de lecture et de formulation d'hypothèses comparable aux qualités nécessaires à un bon diagnostic médical…

C'est ainsi que, dès 2012, les médecins du Memorial Sloan-Kettering Cancer Center de New York (MSKCC) ont lancé un partenariat avec IBM pour développer Watson For Oncology. *"Watson lit le dossier médical électronique du patient. Il étudie ces informations en les comparant à tous les textes médicaux disponibles et aux cas de patients similaires, puis émet des recommandations de prise en charge classées par ordre de confiance"*, détaille Pascal Sempé, directeur de la division santé de Watson en Europe.

Depuis, une vingtaine de centres hospitaliers, principalement aux Etats-Unis et en Asie, testent ce superassistant contre le cancer, terrain de jeu idéal pour l'I.A. : *"C'est une maladie très répandue, sur laquelle il y a énormément de publications. En même temps, elle est extrêmement complexe à traiter. Chaque cas est particulier, selon la taille de la tumeur, son stade d'évolution, etc. Les stratégies thérapeutiques sont donc potentiellement infinies"*, précise Pascal Sempé.

Problème : le corpus médical double tous les cinq ans ; l'heure est à la surcharge informationnelle. *"Un médecin lit au mieux un papier scientifique par jour. Soit 365 par an. Ce n'est qu'un millième de ce qui est publié dans le monde chaque année en médecine !*, confirme Christian Lovis, directeur des sciences de l'information médicale des hôpitaux de Genève. *Suivre tous les résultats dans un domaine, même pour un spécialiste, est devenu impossible."* Les oncologues voient donc d'un bon œil un outil capable de lire 40 millions de documents en… quinze secondes.

Sachant que cette intelligence artificielle n'est pas seulement rapide : sous son capot, IBM a caché un ensemble d'algorithmes capables d'apprendre sans avoir été explicitement programmés pour avoir une connaissance exhaustive du problème étudié. Autrement dit, plus on l'utilise, plus elle apprend. C'est ce qu'on appelle le *deep lear-*

Comment Watson a établi le bon diagnostic en un temps record

Janvier 2015 : devant l'échec de la chimiothérapie de sa patiente, Arinobu Tojo (Institut de sciences médicales de Tokyo) soumet son dossier à Watson, une intelligence artificielle.





WATSON CHARGE LE DOSSIER MÉDICAL DE LA PATIENTE ET LE COMPARE…
L'équipe se connecte à Watson For Oncology, un service en ligne dans lequel elle entre le dossier complet de la patiente : symptômes, antécédents, tests génétiques…

En chiffres

Watson c'est : **90** serveurs IBM POWER 750 ; **2 880** cœurs de processeurs Power 7 ; **80** teraflops (80 000 milliards d'opérations/seconde) ; **16** teraoctets de mémoire RAM (16 384 Go). *(Source : IBM, 2011)*

SPL/PHANIE - IBM - MARTHA HOELZER/FEATURE PHOTO SERVICE FOR IBM

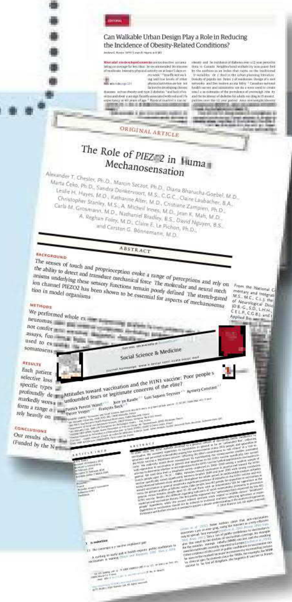




10 MINUTES PLUS TARD, IL PROPOSE UN DIAGNOSTIC AUQUEL NUL N'AVAIT SONGÉ…
Watson a bénéficié de 15 000 heures d'entraînement et peut plonger dans plus de 1,5 million de cas résolus. En analysant les mutations génétiques de la patiente (plus d'un millier), son algorithme trouve une correspondance avec une maladie rare de la moelle osseuse en dix minutes.

… QUI S'AVÈRE LE BON ET ABOUTIT À UN TRAITEMENT EFFICACE POUR LA PATIENTE
L'équipe médicale modifie le traitement en tenant compte du diagnostic de Watson. Les effets positifs se font sentir dans les semaines qui suivent.

… À SA GIGANTESQUE BASE DE DONNÉES
L'algorithme de Watson extrait les éléments clés du dossier médical et les compare à sa base de données : plus de 605 000 essais cliniques, 20 millions de pages de publications scientifiques et 25 000 cas résolus.


Can Walkable Urban Design Play a Role in Reducing the Incidence of Obesity-Related Conditions?

ORIGINAL ARTICLE

The Role of PIEZO2 in Human Mechanosensation

ABSTRACT

Social Science & Medicine

ning (ou l'apprentissage profond, en français).

"Le logiciel est d'abord nourri d'une grande quantité de données, classées en différentes catégories. Puis, pendant la phase d'entraînement, un humain lui soumet de nouvelles données pour vérifier s'il parvient à les classer automatiquement dans la bonne catégorie. En cas d'erreur signalée, le système affine automatiquement ses algorithmes de reconnaissance", explique Martial Mermillod, chercheur au CNRS et à l'université de Grenoble.

C'est sur ce principe d'apprentissage "supervisé" que les équipes du MSKCC ont d'abord entraîné Watson à lutter contre le cancer du poumon. Leur "cyberétudiant" a intégré 600 000 données médicales, 2 millions de pages issues de revues spécialisées, ainsi que les dossiers résolus de 1,5 million de patients. Exactement comme un interne en médecine, il a ensuite été testé d'abord sur des cas résolus, puis sur des cas réels, jusqu'à atteindre un degré de précision satisfaisant. Selon les chiffres de l'assureur Wellpoint, Watson diagnostique le cancer du poumon avec un taux de succès de 90 %, contre 50 % pour un médecin.

UN SYSTÈME D'AIDE À LA DÉCISION

Depuis, son entraînement s'est élargi à une douzaine d'autres types de cancer : côlon, prostate, pancréas, foie, rein… Les recherches s'étendent du diagnostic, pour définir avec précision la nature du cancer, à la mise au point de traitements plus ciblés en fonction, par exemple, des données génétiques du patient. Et pour la première fois, avec le cas de la patiente japonaise, le "docteur" Watson a réussi à fournir sur un cas réel non résolu le diagnostic exact qui échappait à l'expertise humaine.

Bien sûr, aussi prodigieuse peut-elle sembler, la machine doit encore progresser. Selon Arinobu Tojo, le programme ne délivre le bon diagnostic "que" dans 70 à 80 % des cas en moyenne. Il n'est pas toujours aussi pertinent que sur le cancer du poumon, et certaines de ses conclusions sont écartées lorsque les médecins étudient son rapport.

D'où l'importance de passer de l'exemple à la règle : *"Il reste à établir scientifiquement que, grâce à ce système d'aide à la décision, les patients sont mieux traités, ou que le médecin peut traiter plus rapidement à qualité égale*, tempère Cécile Monteil, médecin et fondatrice de l'association Eppocrate, qui réfléchit sur l'apport des nouvelles technologies en médecine. *Or, pour le moment, aucune étude clinique n'a été publiée sur le sujet. C'est tout l'objet des essais*

menés actuellement par différents hôpitaux."

En attendant, l'intelligence artificielle continue de progresser. Et elle ne se contente plus de dévorer des textes médicaux. Son appétit se porte désormais aussi sur un autre type de données très prometteur : l'imagerie médicale.

En la matière, Watson n'est pas seul. DeepMind, l'intelligence artificielle de Google, fait l'objet depuis juillet d'un partenariat avec l'hôpital d'ophtalmologie Moorfield, à Londres. Son objectif : intégrer un million de scanners des yeux pour entraîner ses algorithmes à détecter des maladies oculaires telles que la rétinopathie diabétique, dont les signes précurseurs sont très difficiles à identifier, même pour les spécialistes. Au centre hospitalier de Londres, elle s'exerce également à analyser les radiographies de la tête et du cou pour faciliter le traitement de certains cancers. Tandis qu'en France, la start-up CardioLogs mise sur l'intelligence artificielle pour détecter les subtiles anomalies des électrocardiogrammes, qui peuvent dissimuler jusqu'à 150 pathologies différentes.

La question du secret médical à l'ère du big data

Pour établir un diagnostic, l'intelligence artificielle est amenée à brasser quantité de dossiers médicaux… Mais *quid* de la confidentialité de ces données pour le moins intimes ? Outre le risque de piratage, une polémique a éclaté outre-Manche cet été, suite au partenariat établi entre DeepMind – la branche I.A. de Google – et le système de santé public britannique (NHS). Le géant américain, dont le modèle économique se nourrit de la vente d'informations sur ses utilisateurs, aura en effet accès à quelque 1,6 million d'historiques médicaux ! Soulevant des craintes sur une éventuelle exploitation commerciale de ces données. Avant de se généraliser, les I.A. devront donc apporter des garanties sur l'anonymat des données, leur sécurisation et leur confidentialité.

L'EXPLOSION DU *DEEP LEARNING*

Toutes ces initiatives s'appuient sur une branche du *deep learning* en pleine explosion : les "réseaux de neurones". Ce type d'algorithme excelle à reconnaître des objets très complexes, comme les images. A condition de disposer de données massives. *"Plus les réseaux de neurones sont performants, plus il leur faut des bases de données considérables pour apprendre. Sinon, ils ont du mal à généraliser"*, souligne Martial Mermillod.

A cet égard, est révélatrice l'acquisition en 2015 par IBM du leader mondial de l'imagerie médicale, Merge Healthcare, dont la plateforme de traitement d'images est utilisée par quelque 7 500 centres de soins, instituts de recherche et entreprises pharmaceutiques dans le monde. Watson bénéficie ainsi de 90 millions d'enregistrements correspondant à 315 milliards de points de données pour affiner ses diagnostics et renforcer ses connaissances sur des pathologies comme le diabète, les maladies des yeux, du cerveau et du cœur.

Bref, l'intelligence artificielle apprend vite et recoupe de plus en plus d'informations médicales. Est-ce à dire qu'un Watson ou qu'un DeepMind pourrait un jour remplacer le médecin ? *"On en est très loin*, tranche Christian Lovis, qui y voit plus un outil d'aide à la décision. *Le médecin restera, et pour très longtemps, infiniment plus à même de comprendre un patient qu'une machine. Il y a tellement de subtilités et de non-dits dans le langage et le contact humain !"* Sans compter la question de la responsabilité, le médecin restant le décisionnaire ultime face à la machine.

Un simple outil donc ? Probablement plus, vu les investissements massifs des géants de l'I.A. dans le médical. Après IBM et Google, Microsoft vient en effet de dévoiler en septembre son plan de recherche pour éradiquer le cancer. Une concurrence de haut vol qui promet d'énormes progrès. Dr House 2.0 n'en est qu'à ses débuts. Mais ceux-ci sont déjà très prometteurs.



A voir : des vidéos sur l'entraînement et le fonctionnement de Watson.
A lire : des articles sur la guerre commerciale des géants du Net autour des I.A.



EN SAVOIR PLUS
science-et-vie.com

Nouveaux casques

La réalité virtuelle pas encore “safe”

Plus performants, les nouveaux masques 3D débarquent. Et si l’immersion dans des mondes virtuels s’avère bluffante, les effets secondaires sur la vue et même sur le cerveau sont, eux, bien réels. Un vrai frein, explique **Ophélie Surcouf**.

Le requin vous fixe de son œil noir. Au milieu de votre nacelle, au fond de l’océan, vous reculez d’un pas alors que la bête féroce tente d’arracher la grille qui vous protège avec ses dents. Elle tremble. Le monstre revient à la charge…

Mais voici que tout devient noir. Deux mains retirent le casque de réalité virtuelle qui était posé sur votre tête. Autour de vous, pas de requin. Pas d’eau. Plus de danger…

Cette expérience, *Science & Vie* l’a vécue en testant le Playstation VR à Viva Technology,

Repères

Voilà plus de vingt ans que la réalité virtuelle est exploitée par les chercheurs. Depuis un an, grâce aux progrès technologiques et à la puissance des smartphones qui ont permis de faire baisser les coûts, cette technologie devient enfin accessible au grand public et commence à s’implanter un peu partout (musées, salons, centres commerciaux, parcs d’attraction…).



SHUTTERSTOCK

5 effets secondaires identifiés

un salon dédié au high-tech, organisé en juin dernier à Paris. Les casques y étaient légion. Tout comme le public, avide d'expérimenter l'immersion dans un univers virtuel où il est désormais possible de se déplacer et d'interagir grâce à ces casques – ou masques – qui affichent des images en 3D. Le concept : ils contiennent un écran et des lentilles optiques qui scindent l'image en deux parties, une pour chaque œil, afin de recréer l'impression de 3D. Accéléromètres et gyroscopes permettent ensuite à l'image de s'adapter aux mouvements de la tête, recréant une sensation d'immersion totale.

Cette année 2016 marque une montée en gamme de ces joujoux high-tech avec le lancement mondial de l'Oculus Rift, en mars dernier ; puis du Vive, par le constructeur taïwanais HTC, en avril, et enfin du Playstation VR par Sony, au mois d'octobre.

A l'inverse des produits "low-tech" sortis jusqu'ici – de simples étuis dans lesquels on glisse son smartphone qui fait office d'écran et de gyroscope –, ces nouveaux casques reliés à un PC ou à une console vidéo disposent de leur propre écran, conçu pour la 3D, et s'appuient sur la puissance de calcul des machines auxquelles ils sont raccordés. On s'attendait donc à ce que ces modèles s'affranchissent des désagréments ressentis par certains utilisateurs :

migraines, nausées… qui constituent un véritable "mal de la réalité virtuelle", équivalent au bon vieux mal de mer, principal talon d'Achille de cette technologie.

Or, surprise, même les casques de dernière génération, comme celui de Sony, ne sont pas à l'abri : nous sommes sortis de l'attaque de requin avec un léger vertige, alors que l'expérience n'a duré qu'une dizaine de minutes. De leur côté, d'autres testeurs ont souffert de douleur aux yeux, ou ressenti de petits maux de tête. Signe d'une maîtrise insuffisante de la technologie.

ON MANQUE ENCORE DE RECUL

Premier défaut : elle ne permet pas de restituer l'image en parallaxe, exactement comme notre œil la perçoit (c'est-à-dire avec une profondeur de champ composée de plans dissociés les uns des autres). En particulier, elle ne s'adapte pas aussi finement aux mouvements, ce qui provoque une fatigue visuelle importante. *"D'ici trois ou quatre ans, les caméras* light field *devraient enfin nous permettre de régler ce problème,* prédit Antoine Cayrol, fondateur des studios Okio (spécialistes dans la création d'images de réalité virtuelle). *Cette technologie, dite "plénoptique", permet de capter l'image à la manière de l'œil, en capturant l'intensité, la couleur et la direction des raies de lumière, au lieu de deux images en 2D légèrement décalées."*

Deuxième défaut : la largeur du champ de vision. La plupart des casques sont limités à un champ de 110 degrés, soit la moitié de celui de l'œil. Or cela fatigue notre système nerveux : notre cerveau pioche beaucoup d'informations dans notre vision périphérique, en particulier pour maintenir notre équilibre. Sans compter le temps de latence (le délai entre une action réelle et sa concrétisation dans le casque). Même s'il est souvent inférieur à 20 millisecondes, il reste trop important pour que notre cerveau, et avec lui le reste de notre corps, croit à ce qu'il voit.

Ces défauts de confort restent pourtant presque anecdotiques comparés à d'autres risques pointés par les spécialistes. A commencer par les écrans OLED, qui équipent de nombreux casques et smartphones. Placés à moins de 5 cm de l'œil, ils inquiètent Gilles Renard, directeur scientifique de la société française d'ophtalmologie. Ils pourraient en effet, à terme, provoquer des lésions irréparables sur le cristallin et la rétine

Une nouvelle génération de masques qui ne résout rien

Les nouveaux masques 3D commencent à intégrer leur propre optique et profitent, pour le traitement de l'image, de la puissance de calcul des appareils auxquels ils sont connectés. De plus en plus bluffants, ils ne réussissent pourtant pas, quel que soit leur prix, à corriger leurs effets secondaires sur la vue et le cerveau.



CARDBOARD

FABRICANT	GOOGLE
CONNEXION	SMARTPHONE
DATE DE SORTIE	JUIN 2014
PRIX	20 €

s'ils sont utilisés plus de trois ou quatre heures d'affilée. *"Il faut faire très attention avec les enfants,* admet Laure Leroy, directrice de l'Association française de réalité virtuelle, qui regroupe chercheurs et industriels du secteur, *même si, à ce jour, aucune étude ne permet de savoir si cela risque d'abîmer à terme leur système oculaire."* La solution consisterait à identifier quelles sont les longueurs d'onde les plus nocives, et à les éviter. Mais là encore, les études manquent cruellement.

Autre risque : l'incohérence entre ce que voit l'œil dans le casque et l'immobilité perçue par l'oreille interne, qui peut provoquer des nausées, voire des vomissements. *"Nous avons trois sens qui nous permettent de tenir en équilibre,* explique Franck Assaban, kinésithérapeute vestibulaire. *La vision périphérique, qui*

Quand la réalité virtuelle aide à soigner

Obésité, dépression, douleur, phobies… De nombreuses expériences ont déjà montré que les casques de réalité virtuelle pouvaient être très utiles dans un cadre médical. *"On obtient des résultats incomparables pour soigner des troubles comme le mal des transports",* assure Franck Assaban, kinésithérapeute et fondateur de Virtualis, une entreprise de création de contenus de rééducation en réalité virtuelle. Mais aussi pour traiter certaines phobies spatiales (vertige, agoraphobie), comme le montre le psychiatre Roland Jouvent à La Pitié Salpêtrière. Autre application : aux Etats-Unis, la réalité virtuelle aide à soigner les militaires atteints du syndrome post-traumatique (PTSD).



GEAR VR

FABRICANT SAMSUNG

CONNEXION SMARTPHONE

DATE DE SORTIE NOVEMBRE 2015

PRIX 100 €



OCULUS RIFT

FABRICANT OCULUS VR

CONNEXION PC

DATE DE SORTIE MARS 2016

PRIX 700 €



PLAYSTATION VR

FABRICANT SONY

CONNEXION CONSOLE

DATE DE SORTIE OCTOBRE 2016

PRIX 400 €

est prédominante, mais aussi l'oreille interne et notre proprioception [les sensations sous les pieds, l'étirement des muscles…]. *C'est pour cela que, dans la réalité virtuelle, on peut avoir l'impression de sentir des fourmillements dans l'estomac même sans bouger."*

DIFFICILE RETOUR À LA RÉALITÉ

Pour résoudre ce problème, Samsung a annoncé la sortie prochaine d'un casque audio carrément doté d'électrodes qui enverraient un petit courant électrique afin de stimuler l'oreille interne et diminuer les incohérences sensori-motrices. *"Cela m'étonnerait beaucoup que Samsung obtienne l'autorisation de commercialiser un produit aussi dangereux,* lâche Jean-Louis Vercher, chercheur en neurosciences au CNRS. *Certes, cette technologie* [la stimulation vestibulaire galvanique] *a déjà été utilisée pour de la recherche, mais de façon très ponctuelle, avec une sensation souvent décrite comme désagréable et douloureuse."*

Mais le cerveau lui-même pourrait avoir à en souffrir. C'est du moins ce que laissent craindre les premières études sur le sujet. En plaçant en situation des rats dans un environnement virtuel en 2D, des chercheurs californiens ont en effet montré dès 2013 que 60 % des neurones de leur hippocampe (la partie du cerveau chargée des repères spatiaux) étaient inactifs, et que les 40 % restants agissaient de manière désordonnée. Un constat sans précédent qui montre à quel point la réalité virtuelle affecte profondément notre cerveau. Et ce, même après avoir retiré le casque. Geoffrey Wright, un chercheur de l'université Temple, à Philadelphie, a, lui, constaté qu'après une sollicitation de cinq minutes en réalité virtuelle, le système nerveux central humain mettait plus de deux minutes à "revenir" à la réalité…

Resterait à jauger l'impact psychologique lié à un sentiment de réalisme inédit. *"Se faire attaquer par un requin fait déjà peur. Mais imaginez-vous tuer des gens, en ayant l'impression de le faire avec vos propres mains…"*, interroge David Nahon, directeur du laboratoire d'immersion virtuelle chez Dassault Système.

Pas question de dire ici qu'il faut bannir la réalité virtuelle. Elle a même déjà fait la démonstration de ses vertus thérapeutiques dans différents domaines (lire encadré ci-contre). Mais force est de constater que l'on manque de recul sur l'impact d'une utilisation prolongée, et les façons de le minimiser. D'autant que les constructeurs ne semblent pas vouloir attendre pour commercialiser ce qui s'annonce déjà comme l'une des stars de Noël.

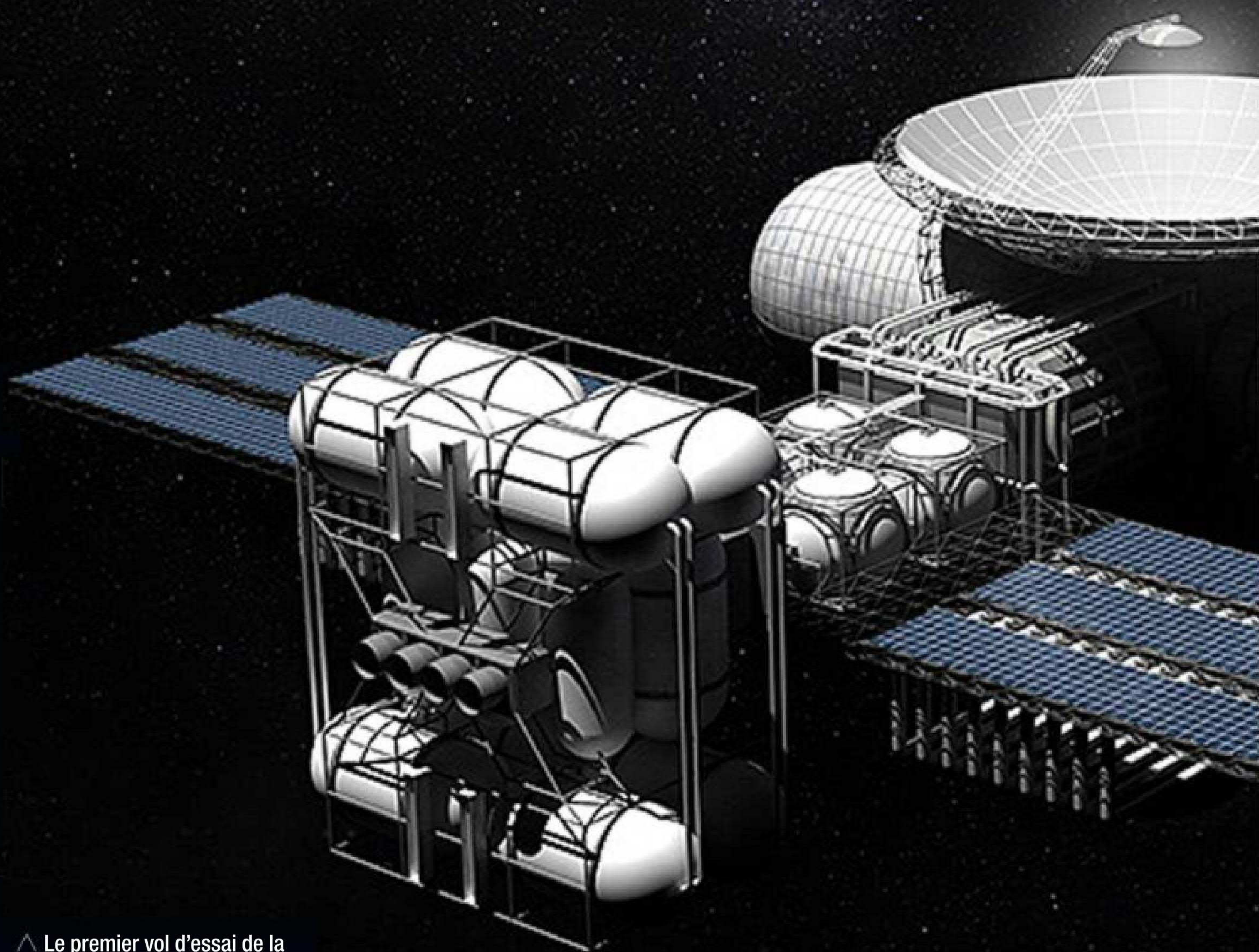
A leurs risques et périls. Et surtout à ceux des utilisateurs.



EN SAVOIR PLUS

A retrouver sur le site : les études citées dans notre enquête.

science-et-vie.com



Le premier vol d'essai de la sonde de prospection minière est prévu pour 2017 : propulsée via de la vapeur d'eau, elle devra d'abord trouver sur les astéroïdes l'eau qui lui permettra d'être totalement autonome.



ÉTATS-UNIS

L'exploitation minière d'un astéroïde est en bonne voie

L'espace, mine du futur? La société Deep Space Industry (DSI) y croit dur comme fer. Elle vient d'annoncer, pour 2020, un plan détaillé de prospection minière d'un astéroïde. Pour ce faire, DSI mise sur Prospector-1, une sonde légère (50 kg) propulsée par un système original fondé sur l'expulsion de vapeur d'eau surchauffée. Grâce à ses caméras visuelles et infrarouges, la sonde scannera la surface de l'astéroïde afin de déterminer l'emplacement d'éventuels gisements. Pas question de platine ni d'autres métaux rares pour l'instant: Prospector-1 va d'abord concentrer ses efforts sur l'eau! Une eau qui servira à réalimenter son propre réacteur… Et à lui conférer une autonomie totale. DSI ambitionne ainsi de valider le premier *"vaisseau d'exploration spatiale low-cost"*, pour une économie spatiale embryonnaire. L'extraction de métaux précieux suivra ultérieurement, si l'expérience est concluante. Mais DSI doit avant tout valider sa technologie avec le lancement de Prospector-X, la petite sœur de Prospector-1, dont le vol d'essai en orbite basse terrestre est prévu pour 2017. **H.L.**

BRYAN VERSTEEG/DEEP SPACE INDUSTRIES



AFRIQUE

Un **ballon** dans lequel on tape devient source **d'électricité**

Apporter la lumière chez les populations les plus pauvres en utilisant la popularité du football ? L'Américaine Jessica O. Matthews, fondatrice de la start-up Uncharted Play, a inventé Soccket, un ballon capable de transformer l'énergie cinétique produite quand on shoote dedans en électricité. Une fois chargée (trente minutes de jeu suffisent), sa batterie interne alimente une lampe à LED – branchée sur le ballon – pendant trois heures. Assez pour que les enfants fassent leurs devoirs le soir. Des ONG distribuent déjà ce ballon au Nigeria, en Côte d'Ivoire et au Brésil. **L.B.**

YAMAKURA (JAPON)

La plus grande **centrale solaire** va être déployée sur **l'eau d'un barrage**

Ce sera la plus importante centrale solaire flottante du monde ! Installée au sud-est de Tokyo sur le lac du barrage de Yamakura, elle entrera en fonction début 2018. Piloté par le géant nippon du solaire Kyocera TCL, ce complexe utilise les panneaux photovoltaïques du français Ciel et Terre, qui seront fixés à des flotteurs en polyéthylène. Il comptera 50904 modules de 270 watts chacun sur une superficie globale de 180000 m^2, et devrait générer 16170 MWh par an, soit la consommation d'un peu moins de 5000 foyers. Pourquoi des panneaux sur l'eau ? *"Parce que le solaire utilise beaucoup d'espace"*, explique Harold Meurisse, de Ciel et Terre. Un espace qui n'entre ainsi en concurrence ni avec les villes ni avec l'agriculture. Autre avantage : son meilleur rendement, car l'eau permet un refroidissement naturel. Un projet encore plus grand est d'ores et déjà annoncé en Chine. **E.T.-A.**

CHINE

Un **hydravion XXL** a été mis au point pour lutter **contre les incendies**

Avec ses 37 m de longueur et ses 39 m d'envergure – l'équivalent d'un Boeing 737 –, l'AG600 dévoilé fin juillet par le constructeur chinois AVIC sera le plus gros hydravion du monde. L'intérêt ? Il pourra déverser à lui seul 12 t d'eau en vingt secondes, soit deux fois plus qu'un Canadair CL-415, et arroser plus de 4000 m² de feux de forêt ! Mais ce n'est pas tout : il peut également emmener 50 personnes sur des opérations de sauvetage en mer, y compris dans des conditions difficiles (vagues de plus de 2 m). L'avionneur annonce déjà 17 commandes : la Malaisie et la Nouvelle-Zélande seraient intéressées. **L.B.**



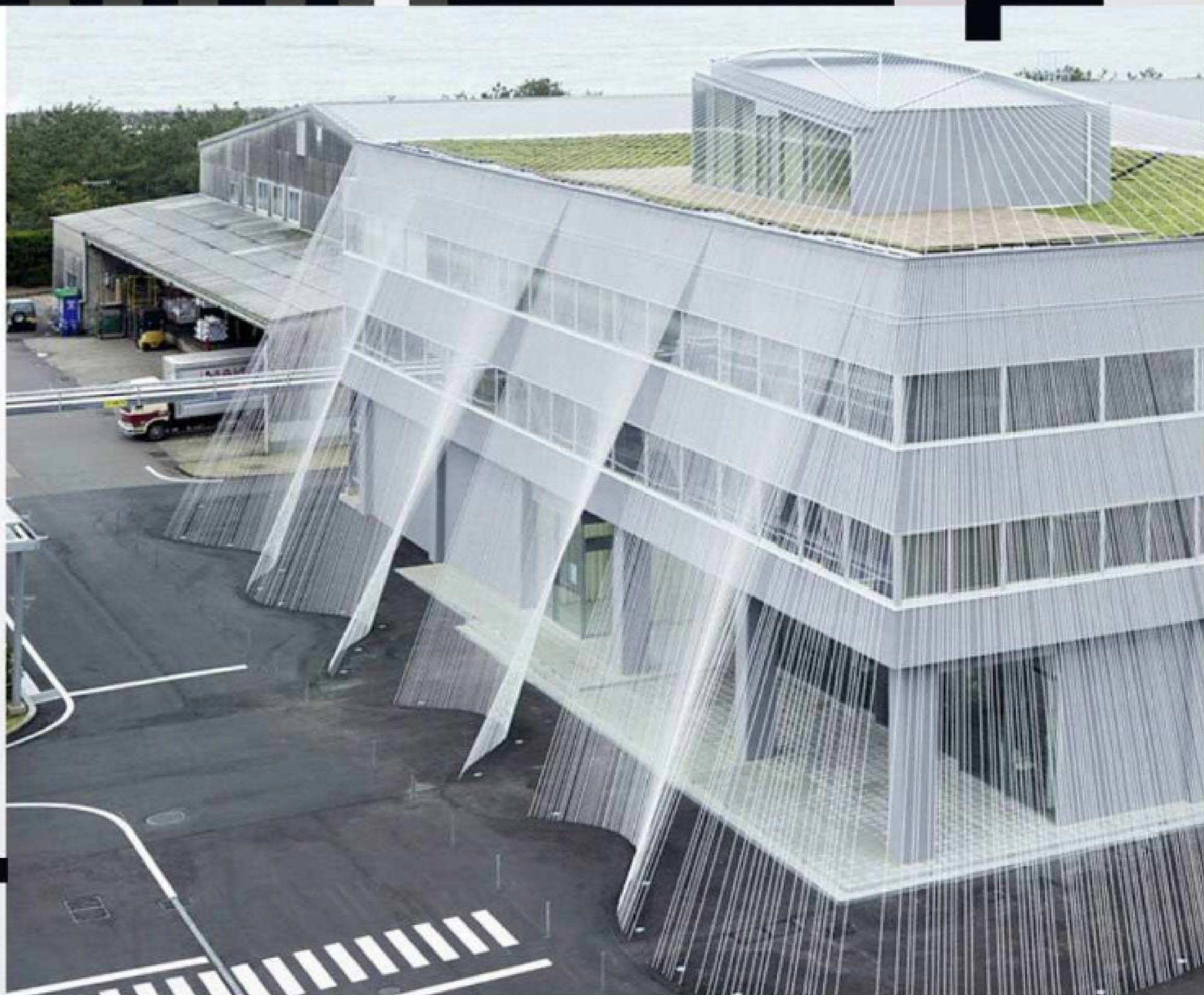
UNCHARTED PLAY - KYOCERA CORP.

Idée neuve

"BRÛLER DES COQUES DE PISTACHES PERMETTRA DE CHAUFFER TOUTE UNE VILLE"

Simon Aulagnier, responsable Aménagement durable et sites chez Burgeap

A Gaziantep, au sud de la Turquie, la ville croule sous les coques de pistaches qui sont cultivées sur place. Considérées comme des déchets, elles ont attiré l'attention de Burgeap, une entreprise française de recherche sur le développement durable. *"Et si, plutôt que d'utiliser du charbon ou d'importer du carburant, on utilisait les pistaches pour se chauffer"*, s'est interrogé Simon Aulagnier, responsable du projet chez Burgeap, avant de se rapprocher d'Atlantique Thermique, une société qui fabrique des foyers à biomasse pour les industries. Leur idée ? Créer un réseau public de chauffage fondé sur la combinaison de trois sources d'énergie. La première, la combustion de coques de pistaches, couvrirait tous les besoins standard. Une chaufferie au gaz pourrait ensuite être activée en cas de nécessité lorsque les températures sont plus fraîches. Enfin, une chaufferie solaire viendrait en renfort. En fonction des productions locales, ce système pourrait se décliner avec d'autres biomasses : des noisettes, des grignons d'olives, de la canne à sucre… **O.S.**



PHILIPPINES

Des lampes à eau de mer pour pallier le manque d'électricité

Il suffirait de verser un verre d'eau mélangée à deux cuillères de sel dans une lampe pour que celle-ci éclaire pendant huit heures ! Mise au point par la Philippine Aisa Mijeno, SALt est une alternative écologique, et économique, aux lampes à kérosène utilisées par des millions de foyers dépourvus d'électricité dans le monde. Techniquement, cette lampe à LED intègre une pile qui fonctionne à l'eau salée et permet même de recharger son smartphone grâce à un port USB. Les habitants des 7 000 îles que comptent les Philippines devraient bénéficier les premiers de cette invention, qui fonctionne aussi avec de l'eau de mer. **L.B.**

SOGNEFJORD (NORVÈGE)

Un premier pont flottant amphibie est à l'étude

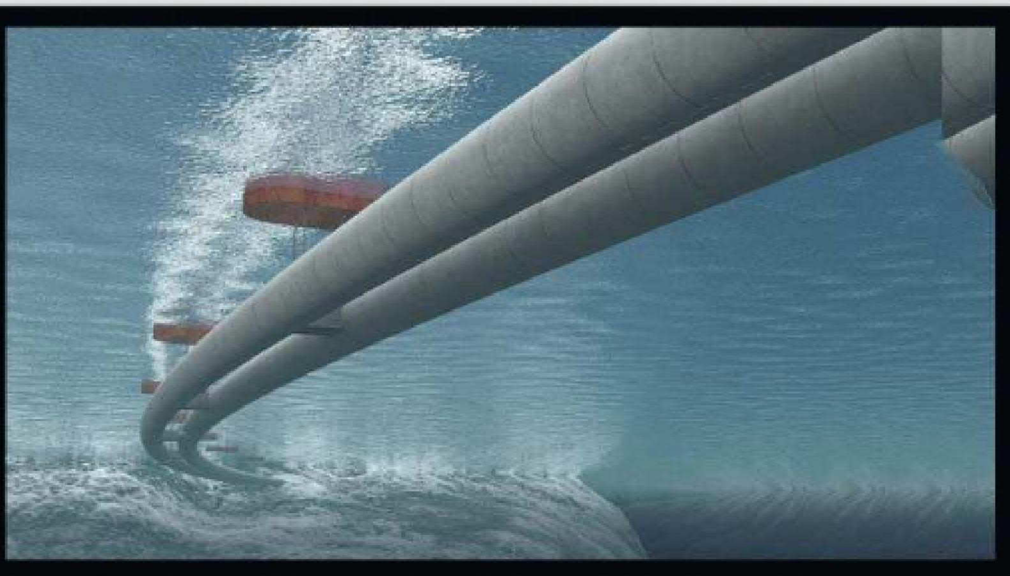
Ni pont, ni tunnel… La Norvège expérimente une solution hybride pour traverser ses fjords : un "pont flottant immergé". Ce double tunnel routier est maintenu 30 m sous la surface de l'eau et stabilisé grâce à des câbles reliés, d'un côté, au plancher marin et, de l'autre, à des pontons qui flottent à la surface. Sur le site du Sognefjord, profond de 1,3 km et large de 3,7 km, les simulations ont montré que cette structure était viable et d'un coût comparable à celui d'un pont suspendu. Des tests à échelle confirmeront sa résistance aux tempêtes et aux collisions de navires. **H.L.**

Nomi (Japon)

Un **cocon en fibre de carbone** innove pour que les édifices résistent aux **séismes**

Maintenir les structures tout en souplesse lors des séismes grâce à un cocon de fils en fibre de carbone thermoplastique à haute résistance… Voilà le nouveau concept parasismique imaginé par la société de textile japonaise Komatsu Seiren. Alliant souplesse, résistance et légèreté, les milliers de fils qui relient le toit de ce showroom au sol permettent de minimiser l'amplitude des déplacements horizontaux lors des secousses. À l'intérieur du bâtiment, des parois constituées de ces mêmes fils entrecroisés se substituent à certains murs pour garantir la mobilité interne. Avantage : la technique peut être appliquée après la construction. **A.P.**





KOMATSU SEIREN - THE-NORWEGIAN-PUBLIC-ROADS

Rendez-vous en… 2030

ON SE SERVIRA DE DRONES POUR POLLINISER LA FLORE À LA PLACE DES ABEILLES

Alors que le déclin des populations d'abeilles devient une véritable menace pour l'agriculture, l'idée d'utiliser des drones pour les remplacer germe. Et si ces appareils pouvaient jouer les pollinisateurs ? Le Beeonic relève le défi. Ailes motorisées, pattes articulées, communication avec ses pairs, autonomie énergétique… Même taille et même morphologie : ce drone se veut le double parfait de sa cousine animale. *"Dans le contexte d'une serre, un mini-drone est tout à fait envisageable pour transférer le pollen,* explique Olivier Peraldi, concepteur canadien du Beeonic. *Nous connaissons les plantes et leurs positions, il n'y a pas de perturbation atmosphérique, le nombre d'insectes est limité et les mini-drones peuvent fonctionner 24 h/24."* Mais concrètement, comment ça marche ? Une petite pompe à vide aspire le pollen sous le thorax et le stocke dans un conteneur abdominal pour, ensuite, le pulvériser sur une autre plante à l'aide d'une valve de sortie. *"Pour le moment ce n'est qu'un concept"*, avoue Charles Bombardier, co-concepteur. Le Beeonic pourrait voir le jour d'ici une dizaine d'années. **A.P.**

ÉTATS-UNIS

Des **espaces verts** commencent à ouvrir dans le **sous-sol de New York**

Un équivalent souterrain de la High Line, le parc suspendu de Manhattan, c'est ce que souhaitent créer à New York James Ramsey et Dan Barasch. Leur Lowline investirait un terminal de tramway souterrain du Lower East Side abandonné depuis 1948. Pour l'éclairer, ils prévoient de capter la lumière en surface à l'aide de miroirs paraboliques qui s'orienteront automatiquement en temps réel. Le rayonnement sera ensuite conduit par fibres optiques vers le sous-sol où un dôme le réfléchira dans tout l'espace, pour recréer la sensation de jour. La végétation (de vrais arbres!) recevra ainsi toute la lumière nécessaire à sa croissance. Une première installation miniature destinée à tester ces technologies est déjà ouverte à la visite à New York. Le parc grandeur nature ouvrirait, lui, ses portes en 2021. **S.F.**



BLOOMBERG VIA GETTY IMAGES

LA SCIENCE & LA VIE

110
"Un verre, ça va"?
En fait, ça ne va pas si bien...



122
Technofolies
Des chaussures intelligentes pour motiver la marche



128
Questions/Réponses
Qu'est-ce qui fait que l'aluminium résiste à la chaleur du four?



"Un verre, ça va" ? En fait, ça ça ne va pas si bien...

Pour beaucoup de Français, un repas ne se conçoit pas sans un morceau de fromage, une baguette fraîche et… un ou deux ballons de rouge. Voire, pour se mettre en appétit, un petit apéritif entre amis.

Si arroser ses repas d'éthanol est une pratique qui a fortement diminué au cours du siècle dernier, ce sont encore 10 % des Français qui consomment quotidiennement de l'alcool. D'après les chiffres de l'OMS, chaque Français de plus de 15 ans consomme en moyenne 2,6 verres de boisson alcoolisée par jour.

Une situation favorisée, bien sûr, par le discours – très apprécié des industriels de l'alcool – selon lequel les longs apéritifs et le vin à table font partie de notre intouchable art de vivre. Mais aussi, probablement, par l'idée répandue qu'une consommation "modérée" d'alcool serait bonne pour la santé.

Cette bonne nouvelle a été diffusée dans les années 1990 après qu'un reportage américain a présenté un nouveau concept très accrocheur : le *French paradox*. Soit l'apparente contradiction entre le très faible taux de mortalité cardio-vasculaire des Français et leur régime très riche en graisses animales, censées boucher les artères. Une contradiction qui semblait trouver une partie de son explication dans notre consommation régulière de vin rouge.

UNE EXCEPTION FRANÇAISE

L'hypothèse d'un effet bénéfique de petites quantités de vin contre certaines maladies cardio-vasculaires est appuyée par un nombre important d'études scientifiques. Des expériences sur des animaux ont ainsi montré que des molécules présentes dans les tanins du vin rouge pouvaient produire des effets bénéfiques (antioxydants, notamment) sur l'organisme. Et un plus grand nombre encore a suggéré que c'est la molécule d'éthanol elle-même, et donc toutes les boissons alcoolisées, qui, à des doses suffisamment faibles et par des mécanismes variés (augmentation du taux sanguin de bon cholestérol, par exemple), protégeraient de certaines maladies cardio-vasculaires. Des études épidémiologiques sont même

LE RAPPEL DES FAITS

En janvier, **le Royaume-Uni** revoyait ses recommandations à la baisse : pas plus de **11 verres par semaine,** qu'on soit homme ou femme. **En France cet été**, la Cour des comptes accusait l'Etat de fermer les yeux et rappelait **les risques liés à une consommation régulière non excessive**. Une **révision des recommandations sanitaires** était lancée.

Une consommation française parmi les plus élevées

Les Français sont les 8e plus gros consommateurs d'alcool dans le monde. Ils boivent près de deux fois plus que la moyenne de tous les pays.

Consommation d'alcool (en litre d'alcool pur/hab/an)

15
12
9
6
3
0

France : 11,7 l/hab/an

Moyenne mondiale 6,2 l/hab/an

Biélorussie
[redacted]
[redacted]
République tchèque
[redacted]
Autriche
Irlande
[redacted]
Sainte-Lucie
[redacted]
[redacted]
Allemagne
[redacted]
[redacted]
[redacted]

10 %

C'est le pourcentage des Français de plus de 15 ans qui boivent quotidiennement.

Les Français boivent surtout du vin

Avec 55 litres par an et par habitant, les Français sont les premiers consommateurs de vin.

Vin 60 %
Spiritueux 22 %
Bière 18 %

SOURCES : *EVOLUTIONS*, AVRIL 2015 ; COUR DES COMPTES, JUIN 2016 ; OMS

arrivées à la conclusion que boire quelques verres d'alcool par jour augmenterait l'espérance de vie.

Cette hypothèse alléchante, qui promet de se faire plaisir en se faisant du bien, semble confortée par nos autorités sanitaires, dont la communication se concentre sur la prévention des consommations "excessives" : pas plus de deux verres par jour pour les femmes et de trois pour les hommes, sinon *"des effets néfastes peuvent se manifester"*. Les publicités pour l'alcool sont quant à elles tenues de nous informer que c'est l'abus d'alcool qui est dangereux pour la santé. Une apparente tolérance vis-à-vis des consommations "faibles" dont joue beaucoup l'industrie de l'alcool (voir encadré page suivante).

Aujourd'hui, l'idée est donc bien ancrée : *"La plupart des gens font le lien entre alcool et bénéfices cardio-vasculaires"*, affirme Mickaël Naassila, directeur d'un groupe de recherche sur l'alcool à l'université de Picardie Jules Verne et président de la Société française d'alcoologie.

C'était avant qu'un nombre croissant d'études, ces dernières années, ne remettent en cause l'idée que de faibles doses d'alcool seraient bonnes pour la santé, pointant notamment les



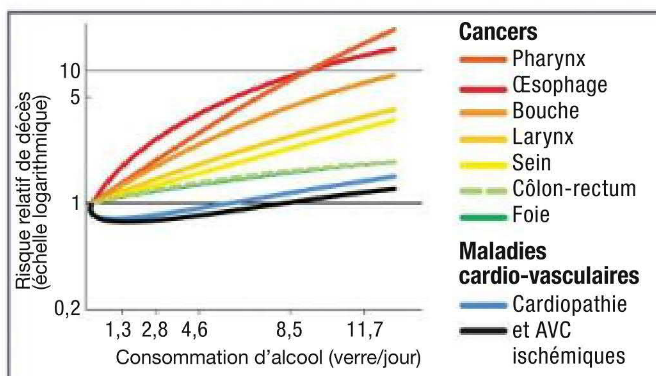
TANYA **CHIKRITZHS**
Epidémiologiste, université Curtin (Australie)

Les effets protecteurs d'une pratique populaire, c'est une belle histoire, qui se vend bien

faiblesses méthodologiques des travaux qui plaidaient le contraire.

Plusieurs études ont ainsi montré la présence de biais dans les recherches épidémiologiques sur les bénéfices potentiels de faibles doses d'alcool. La dernière, publiée en juin, suggère que la baisse de mortalité liée à la consommation régulière de quelques verres par jour serait entièrement due à ces biais. Les chercheurs surestimeraient notamment la mortalité des abstinents en comptant parmi eux les anciens alcooliques et les malades.

Des risques qui dépasseraient finalement les bénéfices



Alors que les bienfaits de faibles doses d'alcool contre certaines maladies cardio-vasculaires (courbes bleue et noire) sont de plus en plus débattus, leurs effets néfastes sur sept cancers notamment suggèrent que les risques dépassent de toute façon les bénéfices.

EN CAUSE DANS 7 CANCERS

Comment de telles erreurs auraient-elles pu passer inaperçues pendant plus de vingt ans ? Cela semble difficile à croire… Mais selon Tanya Chikritzhs, épidémiologiste à l'université Curtin (Australie) et auteur de l'étude, le contexte particulier de la recherche en alcoologie peut l'expliquer: *"Il est plus facile de publier des études montrant les effets protecteurs d'une pratique populaire que celles qui les contredisent, car c'est une belle histoire, qui se vend bien"*, affirme-t-elle. Et de dénoncer ensuite le fait que *"les industriels de l'alcool financent de très nombreuses recherches"*. A en croire les documents publiés par les fondations qu'ils subventionnent, de telles études se compteraient effectivement par milliers.

Les propriétés spécifiques du vin ont également été remises en cause. Ainsi, une étude de 2014 montrait que le taux urinaire de resvératrol (la molécule censée conférer au vin rouge ses propriétés bénéfiques) n'était prédictif ni d'une plus grande longévité ni d'une plus faible mortalité cardio-vasculaire. Quant au paradoxe français, il a, depuis les années 1990, trouvé plusieurs explications alternatives. Parmi elles, le fait que les graisses saturées présentes dans notre beurre et notre fromage seraient finalement moins néfastes pour nos artères que les acides gras "trans" présents dans les produits industriels (voir *S&V* n° 1125).

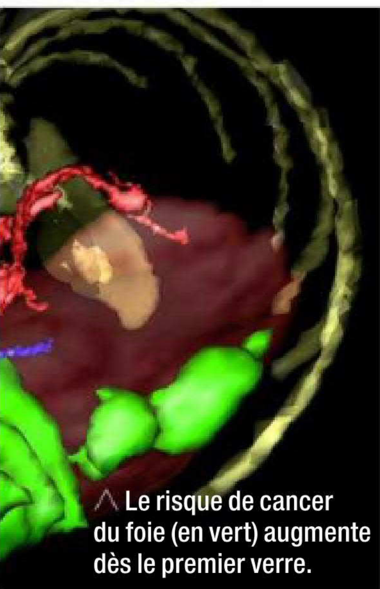
Enfin, le lien entre alcool et cancer se resserre. Une étude publiée en juillet dernier rappelait, par exemple, que la consommation d'alcool favorise l'apparition d'au moins sept cancers différents, et que l'effet est proportionnel à la quantité bue. Une augmentation du risque a même été observée chez les femmes dès deux verres par semaine !

Même si la consommation de faibles doses présentait un léger avantage sur la mortalité cardio-vasculaire, ce dernier pourrait donc être annulé par les effets de l'alcool sur le cancer. C'est en tout cas ce que suggérait une étude française dès 2013, qui estimait, en tenant compte des bénéfices et risques supposés, que chez les Français buvant entre

L'ABUS D'ALCOOL EST DANGEREUX POUR LA SANTÉ. À CONSOMMER AVEC MODÉRATION.
Aimer le vin, c'est connaître les repères de consommation* :
2 verres maximum par jour pour les femmes
3 verres maximum par jour pour les hommes
4 verres maximum en une seule occasion
0 verre un jour par semaine

Des recommandations sanitaires détournées

En décembre 2015, le lobby du vin lançait une campagne censée promouvoir une consommation d'alcool "raisonnable". Problème: elle se basait sur un plafond correspondant… aux seuils de danger déterminés par l'OMS. Et 3 verres par jour 6 jours par semaine devenaient des quantités raisonnables pour un homme! Cette stratégie de détournement n'est pas nouvelle: "A consommer avec modération" est un conseil que les producteurs nous donnent de leur plein gré sur leurs publicités! A croire que l'idée de modération fait vendre…


Le risque de cancer du foie (en vert) augmente dès le premier verre.

1 et 3 verres par jour, l'alcool provoquait plus de décès qu'il n'en prévenait. Plusieurs milliers de morts par an apparaissaient ainsi imputables à ces consommations "modérées".

Bien sûr, le débat scientifique n'est pas clos. Mais il existe; et probablement plus que dans l'esprit des consommateurs. Ces derniers pourraient cependant bientôt y voir plus clair: alors que plusieurs pays (Royaume-Uni, Italie…) ont récemment revu à la baisse leurs recommandations en termes de consommation d'alcool, les autorités sanitaires françaises viennent d'entamer des réflexions sur ce thème afin, notamment, d'adapter leurs conseils aux nouvelles données de la science. Verdict attendu d'ici un an ou deux. Notre "art de vivre" pourrait bien en prendre un coup… **Elsa Abdoun**

Pour aller plus loin:
www.science-et-vie.com

Navigateurs en solitaire

Un sommeil fractionné est aussi réparateur qu'une nuit de 8 h



BERTRAND **DE LA GICLAIS**
Médecin, responsable du Centre du sommeil d'Annecy-Argonay

LE RAPPEL DES FAITS

Le **6 novembre 2016**, pour la huitième édition du **Vendée Globe**, 29 skippers s'élanceront pour un tour du monde en solitaire, sans escale et sans assistance.

Science & Vie: Vous étudiez le sommeil des navigateurs depuis vingt ans. En quoi est-il spécifique?
Bertrand De La Giclais: Ne pouvant pas "lâcher" leur bateau très longtemps, ils dorment en fractionné. C'est ce qu'on appelle le sommeil "polyphasique".

S&V: Est-il aussi réparateur qu'une nuit complète ?
B.G.: Oui, c'est justement l'idée: que les skippers aient un sommeil en épisodes de 20 mn à 1 h 30 aussi efficace qu'une nuit de 8 h. Mais avant d'y arriver, ils accumulent une dette de sommeil lors des premières 48 h passées en mer. Pour ne pas se retrouver dans le rouge, ils doivent concentrer leur sommeil réparateur sur un temps réduit, en utilisant les "portes du sommeil". Ces moments, les plus fastes pour récupérer, sont les phases de sommeil lent profond pour la récupération physique, et le sommeil paradoxal pour l'aspect psychique. Ainsi, 70 % de leur sommeil est récupérateur, contre 40 % lors d'une nuit complète.

S&V: A-t-on tous les mêmes plages de sommeil?
B.G.: Elles varient légèrement selon les individus, mais se trouvent généralement entre 23 h et 1 h, entre 4 h et 6 h et en début d'après-midi. J'enregistre sur vingt-quatre heures le sommeil d'un navigateur pendant une sortie en mer pour déterminer ses plages horaires les plus courtes.

S&V: Comment peut-il s'adapter aussi vite?
B.G.: Il s'agit en fait d'une régression, car nous naissons avec un sommeil polyphasique. Le nourrisson, puis l'enfant, avec la sieste, dort jusqu'à 4 ans par épisodes. L'homme préhistorique aussi, qui craignait les prédateurs; et au Moyen Age le sommeil était encore coupé en deux. C'est avec l'évolution de notre mode de vie qu'il est devenu monophasique.

S&V: Les travailleurs de nuit peuvent-ils adopter ce sommeil polyphasique sur le long terme?
B.G.: Oui. Il est même indispensable pour tenir. L'idéal pour eux est de dormir en deux fois: au petit matin et en début d'après-midi. Ce sont les meilleures portes du sommeil. C'est mieux que de dormir de 5 h du matin jusqu'à 13 h par exemple, car à partir de 10 h, ce n'est plus récupérateur. Le sommeil biphasique est bien plus rentable.

Propos recueillis par Lise Gougis



Piétonnisation des berges de Seine

Fermer une route allège en fait la circulation

Dès l'annonce, par la mairie de Paris, de son intention de poursuivre la piétonnisation des bords de Seine, les réactions ont fusé. Usagers, élus et collectivités tempêtent à l'idée qu'une partie des voies sur berge de la rive droite soit interdite aux voitures, alors même que le trafic y est déjà dense, voire saturé aux heures de pointe. Sous-entendu : cela va aggraver la situation.

Pourtant, nombre d'expériences, en France comme à l'étranger, montrent tout le contraire. *"Lorsqu'on ferme une route, on constate toujours la même chose : la circulation diminue"*, affirme Paul Lecroart. Cet urbaniste à l'Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France a analysé douze cas de transformation de voies rapides en larges avenues à vitesse réduite et pistes cyclables à travers le monde. Résultat : le trafic journalier diminue non seulement sur les axes concernés, mais aussi sur les périmètres de report de circulation. Une baisse qui va de 9 % à Séoul à 35 % à Milwaukee (Etats-Unis).

Et la France ne fait pas exception. Comme à Rouen, où le pont Mathilde, emprunté jusqu'en 2012 par 92 500 véhicules par jour, est devenu un cas d'école. Le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) Normandie-Centre a étudié l'impact sur la mobilité de sa fermeture, à la suite d'un incendie, durant près de deux ans. Chaque jour, en moyenne, 21 000 véhicules de moins ont traversé la Seine dans l'agglomération – l'équivalent d'environ 26 000 déplacements individuels. Si une partie s'est reportée sur les transports en commun, la marche ou le vélo, plus de 10 % des déplacements initiaux ont tout simplement… disparu (voir ci-contre) !

Comment expliquer une telle évaporation du trafic ? *"Certains automobilistes renoncent à leur trajet, s'ils estiment qu'il n'est finalement pas si utile"*, analyse Paul Lecroart. D'autres changent de destination, en choisissant par exemple d'aller faire leurs courses à un endroit plus accessible.

BEAUCOUP DE FACTEURS

"Les simulations de trafic sous-estiment ces changements de comportement, regrette l'urbaniste. *Pourtant, la mobilité est un phénomène social et individuel où l'offre et la demande interagissent constamment."*

Baisse de la demande, report vers d'autres modes de transport, changement d'itinéraire… Autant de facteurs interdépendants à prendre en compte dans les

LE RAPPEL DES FAITS

Après la **rive gauche en 2013,** la Ville de Paris a décidé **en septembre** de fermer à la circulation plus de **3 km de voies sur berge sur la rive droite.**

D.MAILLAC/REA - S.AQUINDO - D.R.



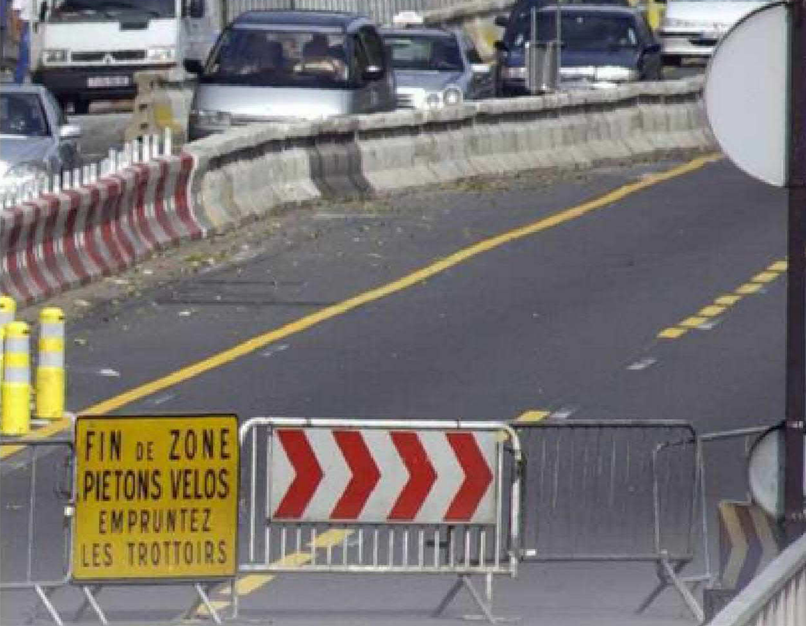
EN CHIFFRES

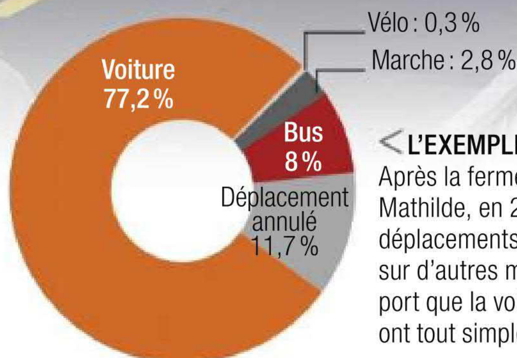
45 %

… des accidents de la vie courante (chutes, chocs, brûlures) surviennent à la maison, et surtout dans le jardin, d'après l'Inserm. Les lieux les plus dangereux sont ensuite les équipements de loisirs (14 %), les aires de sport (9 %) et les zones de transport (5 %).

5,6 milliards

Ce sera le nombre d'abonnés au téléphone mobile dans le monde d'ici à 2020, selon les estimations de GSMA Intelligence et d'Ericsson. Soit plus que le nombre de personnes ayant accès chez elles à l'électricité (5,3 milliards) ou à l'eau courante (3,5 milliards).





L'EXEMPLE DE ROUEN
Après la fermeture du pont Mathilde, en 2012, 11,1 % des déplacements se sont reportés sur d'autres moyens de transport que la voiture… et 11,7 % ont tout simplement disparu !

SOURCE : CEREMA NORMANDIE-CENTRE

simulations de trafic liées à la suppression d'une route. Il est donc très difficile de modéliser la nouvelle répartition des usagers sur le réseau, entre différents points d'origine et de destination. *"En général, les automobilistes choisissent l'option la plus rapide, mais le coût compte aussi. Par ailleurs, si beaucoup d'usagers empruntent le même itinéraire, le temps de parcours augmente, et d'autres chemins deviennent alors compétitifs"*, détaille Vincent Aguiléra, chercheur au Laboratoire ville, mobilité, transport de l'Ecole des Ponts ParisTech.

Des effets évolutifs qui rendent d'autant plus complexes les estimations. Pour Paul Lecroart, une chose est sûre : les simulations de trafic surestiment souvent les problèmes de circulation causés par la suppression d'une voie. **Nathalie Picard**

53 %



… des véhicules immatriculés en France dans les cinq premiers mois de 2016 étaient équipés d'un moteur diesel (contre 73 % en 2012). La perte de confiance suite aux tests falsifiés par Volkswagen va sans doute encore accélérer le recul du diesel.

ON TENAIT À VOUS DIRE





Contre les moustiques, le remède pourrait être pire que le mal

Face à la progression des maladies propagées par les moustiques (chikungunya, dengue, fièvre jaune et tout récemment Zika), la tentation est grande de partir en guerre totale contre ces derniers… parfois au mépris de toute prudence.

Le problème est que cette menace épidémique surgit alors que les limites des solutions chimiques actuelles sont avérées, mais que les solutions biologiques ne sont, elles, pas vraiment prêtes. En Caroline du Sud, l'épandage par avion d'un insecticide, le Naled, contre la menace Zika, a ainsi décimé les abeilles, et probablement gravement touché insectes sauvages, oiseaux et poissons, tandis qu'un impact sur la santé humaine est à craindre (le produit est interdit en Europe). Il est très difficile de savoir, pour l'instant, l'effet de ces actions sur Zika (jusqu'ici quasi absent de Caroline du Sud, avec 43 cas importés). Mais il serait tragique qu'aux éventuelles malformations provoquées par le virus sur les futurs bébés s'en ajoutent d'autres, dues aux pesticides, dont certains franchissent la barrière placentaire !

Quant aux solutions biotechnologiques, elles sont nombreuses : moustiques infectés par une bactérie, ou génétiquement modifiés pour avoir une descendance stérile, ou dotés de *gene drives*, des dispositifs génétiques surpuissants potentiellement capables de faire disparaître l'espèce qui les porte. Mais beaucoup de ces outils, notamment ces derniers, sont loin d'être prêts pour un usage dans la nature.

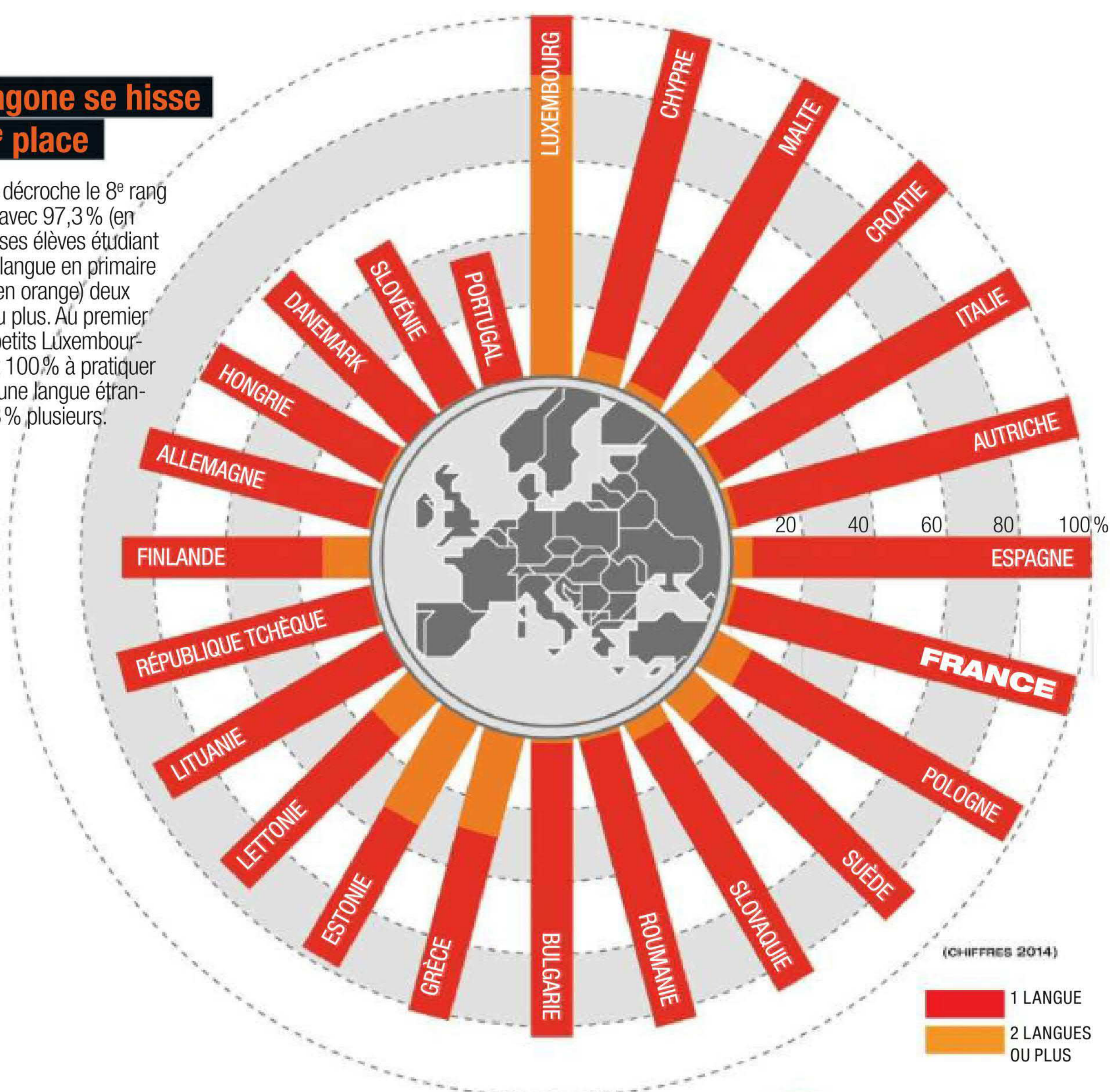
Les agences sanitaires doivent, dans ce contexte, garder la tête froide et lutter contre les maladies sans pratiquer la terre brûlée, en attendant de nouvelles avancées de la recherche. **Yves Sciama**

Apprentissage des langues étrangères

La France a rattrapé son retard dans l'étude des langues en primaire

L'Hexagone se hisse à la 8e place

La France décroche le 8e rang européen avec 97,3 % (en rouge) de ses élèves étudiant une autre langue en primaire et 1,7 % (en orange) deux langues ou plus. Au premier rang, les petits Luxembourgeois sont 100 % à pratiquer au moins une langue étrangère et 83 % plusieurs.



99 %

C'est le pourcentage total de petits Français qui apprennent aujourd'hui en primaire au moins une langue étrangère, soit bien plus que la moyenne européenne de 83,7 %.

45 %

C'était, en 1999, le pourcentage d'enfants de primaire qui étudiaient une autre langue dans l'Hexagone.

92,7 % apprennent l'anglais

5,5 % l'allemand

Sources : Eurostat - Eurydice

M.KONTENTE

AU FINAL, CE SONT 13 CANCERS QUE LE SURPOIDS FAVORISE !

Selon le Centre international de recherche sur le cancer, le surpoids favorise en plus des cancers du côlon, du rein, de l'utérus, du sein et de l'œsophage, les méningiomes, les myélomes, les cancers de l'estomac, du foie, de la vésicule biliaire, du pancréas, des ovaires et de la thyroïde. "NEJM", août 2016



FUMER DU CANNABIS RENDRAIT FAINÉANT

C'est ce que révèle une étude canadienne portant sur des rats. Entre une tâche simple et une tâche complexe deux fois mieux récompensée, les rats choisissaient la tâche complexe en condition normale, et la simple après avoir ingéré du THC, la molécule active du cannabis. "JPN", août 2016

POSTER SUR LES RÉSEAUX SOCIAUX AIDE À SE SOUVENIR

Pour graver un moment dans votre mémoire, postez-le sur le Net ! Les tests de mémoire surprises menés sur 66 étudiants américains tenant un journal intime montrent qu'ils se rappellent surtout les événements qu'ils ont aussi partagés sur les réseaux (+15 %). "Memory", août 2016

ATTENTION AUX INSTRUMENTS À VENT MAL LAVÉS

S'ils ne sont pas lavés après utilisation, les instruments à vent condensent l'humidité et constituent un milieu idéal pour la prolifération des champignons. Au point de provoquer, dans de rares cas, des maladies fatales chez ceux qui en jouent ! Des chercheurs américains ont ainsi récemment décrit le cas d'un joueur de cornemuse ayant développé une inflammation des poumons appelée "pneumopathie d'hypersensibilité". Or, des cas similaires avaient déjà été rapportés chez un saxophoniste et un tromboniste. Ces patients, une fois qu'ils se sont mis à laver leurs instruments, ont vu leur état s'améliorer. "Thorax", août 2016

BARBIE DONNE BEL ET BIEN DES COMPLEXES AUX PETITES FILLES

Presque toutes les filles ont joué avec une de ces poupées au moins une fois dans leur vie. D'où l'importance du problème : les Barbies, avec leurs proportions irréalistes (atteintes par une femme sur mille en moyenne, d'après de précédentes études) donnent des complexes aux petites filles. C'est ce que vient à nouveau de confirmer une série d'expériences menées par des chercheurs américains. Des centaines de filles âgées de 6 à 8 ans ont été invitées à jouer avec des poupées de différentes corpulences, puis à remplir un questionnaire évaluant leur satisfaction vis-à-vis de leur silhouette. Résultat : trois minutes de jeu avec une poupée trop mince suffisaient à donner des complexes à ces enfants ! "Body Image", sept. 2016





ON OBÉIT MIEUX À UN SUPÉRIEUR QUI NE SE MET PAS EN COLÈRE

Placés face à une situation déplaisante, certains supérieurs hiérarchiques préfèrent se fâcher pour affirmer leur autorité auprès de leurs subordonnés plutôt que d'afficher de la tristesse. Pourtant, des expériences récentes menées dans des laboratoires allemand et autrichien montrent que c'est moins efficace. Si les subordonnés attribuent effectivement à un chef se mettant facilement en colère un fort pouvoir coercitif, ils envisagent en revanche plus facilement comme un référent celui qui exprime sa déception par de la tristesse. Un résultat qui explique enfin pourquoi, selon de précédentes études, un leader s'énervant peu obtient de meilleurs résultats sur le long terme : c'est parce qu'il développerait de meilleures relations avec ses employés, qui lui seraient plus loyaux. "Journal of Business and Psychology", août 2016

SEXE APRÈS 60 ANS : PLUS RISQUÉ POUR LES HOMMES

Une étude portant sur 3000 Américains de 57 à 85 ans montre qu'une vie sexuelle épanouie est corrélée à une faible tension artérielle chez les femmes, contre une augmentation du risque cardio-vasculaire chez les hommes. "J. Health Soc. Behav.", sept. 2016

REGARDER UN FILM TRISTE FAVORISE L'ESPRIT DE GROUPE

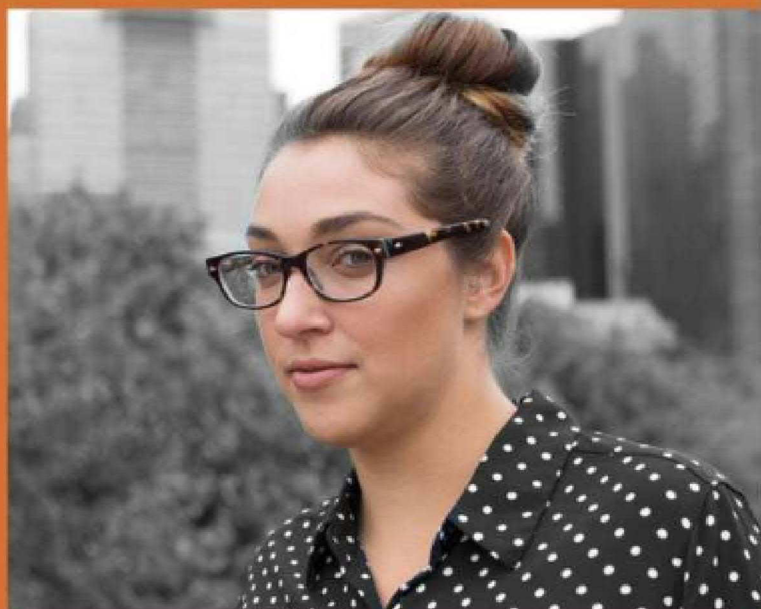
En visionnant ensemble un drame, des individus ne se connaissant pas ont vu leur cohésion renforcée, contrairement à ceux placés devant un documentaire. Comme le rire ou la danse, les histoires tristes influent donc sur nos relations. "R. Soc. Open Sci.", sept. 2016

LES MASQUES ANTIPOLLUTION NE SERVENT PRESQUE À RIEN

Une étude américaine ayant testé l'efficacité des masques antipollution utilisés dans les mégalopoles asiatiques révèle qu'ils ne limitent que partiellement l'exposition aux particules fines. Et les moins chers sont aussi les moins efficaces. "J. of Exp. Sci. and Enviro. Epidemio.", août 2016

QUI PORTE DES LUNETTES SE CAMOUFLE

"Est-ce la même personne ?" ont demandé des chercheurs américains à des volontaires en leur présentant deux photos. Sur chaque paire, les individus à reconnaître portaient soit des lunettes dans les deux cas, soit sur aucune, soit sur une seule. Dans le dernier cas, les participants ont obtenu de moins bons résultats que pour les deux premiers. De quoi expliquer, selon les facétieux chercheurs, pourquoi la double identité de Clark Kent/Superman n'a jamais été confondue. Plus sérieusement, ils espèrent que leurs travaux, qui démontrent que le fait d'enlever ses lunettes sur la photo du passeport est contre-productif, faciliteront les contrôles d'identité. "Applied Cogn. Psych.", août 2016





La première aile couplée à la réalité virtuelle

Piloter facilement un avion et voir le paysage comme si l'on était dans le cockpit. Voilà les nouvelles sensations que Parrot promet de vivre avec son modèle Disco. Ce drone n'est pas un quadricoptère (4 rotors horizontaux) comme beaucoup d'autres, mais un avion ultraléger (750 g) de 115 cm d'envergure, avec ailerons mobiles et winglets (extrémités verticales des ailes), propulsé par un moteur à hélice. Il se pilote simplement avec une télécommande wi-fi, qui est une sorte de manette de console de jeu. Le décollage et l'atterrissage sont automatisés. Et les différents équipements intégrés (GPS, accéléromètre, gyroscope, altimètre…) permettent au drone de maintenir tout seul son cap, son altitude et sa vitesse… jusqu'à 80 km/h ! Mais le plus fort est qu'en connectant son smartphone (iOS ou Android) sur la télécommande ou à l'intérieur du casque de réalité virtuelle Cockpitglasses, l'utilisateur peut visualiser en direct les images saisies par la ca-

Le pot de fleurs qui lévite



L'effet est garanti : ce pot à facettes et sa plante flottent dans les airs. Une pichenette, et l'ensemble tourne lentement sur lui-même. Pour fonctionner, ce gadget utilise la lévitation magnétique. Le plateau en chêne, posé sur la table et muni d'une prise électrique, cache en fait un électroaimant. Lequel crée un champ magnétique qui repousse l'aimant situé au fond du pot en silicone. Poids maximal que le pot peut accueillir : 250 grammes. Le fabricant recommande les plantes dites "aériennes", ne nécessitant pas de terre, comme les tillandsia, qu'il propose aussi à la vente. La consommation électrique est comparable à celle d'un téléviseur en veille. Attention, en cas de panne électrique ou de débranchement, le pot retombe. La gravité garde le dernier mot ! **O.L.**

Prix : env. 200 €. Rens. : https://eu.flyte.se

< Un électroaimant dans le plateau, un aimant au fond du pot : il s'élève !



Télécommande en main et casque sur le visage, le pilote s'immerge dans le paysage filmé par la caméra fixée sur le nez du drone.

méra Full HD grand angle située à l'avant de l'appareil et s'immerger dans le vol. L'expérience dure, grâce à sa batterie Li-Po, environ 45 minutes, et les prises de vue peuvent être enregistrées sur ses 32 Go de mémoire. **L.B.**

Prix : env. 1 300 € (avec casque vidéo et télécommande)
Rens. : www.parrot.com/fr

La télécommande wi-fi a une portée de 2 km. Le casque fonctionne en glissant son smartphone à l'intérieur.

Télécommande wi-fi Skycontroller 2





Casque Cockpitglasses

LE COIN DES PROTOTYPES

Un meuble robotisé pour optimiser l'espace

Fini les intérieurs encombrés des petits appartements ! Née d'un programme du MIT visant à repenser l'habitat urbain, la start-up Ori a imaginé un concept de meubles robotisés capables de bouger, de se réagencer sur commande… et de transformer un studio en chambre, salon ou bureau en un clin d'œil. Grâce à un bouton ou une application, le meuble peut ainsi glisser au fond de la pièce pour faire office d'étagère, revenir au centre et déployer un lit, voire présenter un plan de travail. Si les chercheurs du MIT ont signé la partie mécatronique, le designer suisse Yves Béhar a supervisé le tout pour obtenir 5 prototypes, actuellement en test à Boston. **H.L.**

Rens. : http://orisystems.com/#welcome-home



Un détecteur de gluten à emporter partout avec soi

Si, comme Shireen Yates, vous souffrez d'intolérance au gluten, dîner dehors est une gageure. Avec Scott Sundvor, un camarade du MIT, cette Américaine a conçu Nima, un détecteur portable qui révèle la présence de gluten grâce à des anticorps. Il suffit de déposer un peu d'aliment dans une capsule à usage unique, qui s'introduit dans l'appareil. Deux minutes plus tard, le résultat apparaît : un sourire, c'est sans gluten ; un *smiley* bougon, il y en a. Nima décèle jusqu'à 20 ppm de gluten, la limite américaine pour afficher "sans gluten". La sauce soja et la bière résistent néanmoins au test car la fermentation modifie la structure du gluten et rend les anticorps inefficaces. La vente de Nima a déjà débuté aux Etats-Unis. Pour le trouver en France, patience ! **A.V.**

Prix : env. 260 € (avec 12 capsules)
Rens. : www.nimasensor.com

Il suffit de 2 minutes à Nima pour détecter la présence de gluten. Un sourire ? Il n'y en a pas !



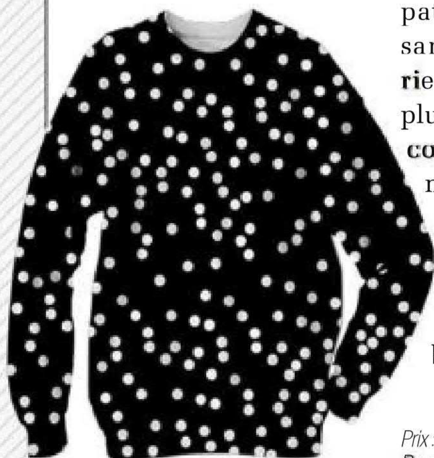
Des chaussures intelligentes pour motiver la marche



Voici les Smartshoe 001, de la société française Digitsole. Ces chaussures au design surprenant se contrôlent, via Bluetooth, grâce à une application dédiée sur smartphone ou smartwatch. Elles disposent ainsi d'options originales comme la possibilité de s'autolacer ! Pour ce faire, un système de serrage/desserrage, constitué de vérins miniaturisés, se déclenche à l'aide du smartphone, permettant d'adapter la chaussure exactement à la largeur du pied. Autres atouts : elles sont chauffantes, grâce à une semelle thermique complétée d'un thermostat qui ajustent la température, et elles disposent d'un éclairage à LED au bout des pieds. Elles intègrent également un podomètre, qui permet de calculer

Des sweat-shirts qui affichent la pollution

L'air que vous respirez est-il pollué en particules (poussières, saletés, suie, fumée…) ? Pour le savoir, portez ce sweat-shirt Aerochromics (lancé par le designer américain Nikolas Bentel) ! Le principe : le sweat intègre deux petits capteurs, l'un devant, l'autre sur le dos. En présence de particules, les capteurs alertent un microcontrôleur caché dans le col qui active alors une série de patchs thermiques faisant apparaître une série de points de plus en plus blancs. La collection comporte deux autres modèles de pulls qui permettent, l'un de détecter le monoxyde de carbone, l'autre la radioactivité ambiante. **E.T.-A.**



Prix : à partir de 450 €
Rens : www.aerochromics.com

La poussette avec batterie pour charger son smartphone

Pour les parents inquiets à l'idée de tomber en panne de batterie, la société américaine 4moms propose Moxi. Cette poussette high-tech est munie de deux générateurs au niveau des roues arrière, qui récupèrent l'énergie induite par la rotation des roues et la transforme en énergie électrique. Un port USB installé à l'avant de la poussette permet ainsi d'alimenter n'importe quel appareil électronique. **S.D.**



Prix : env. 630 €
Rens : www.4moms.com/moxi

DR

la distance parcourue et les calories brûlées, et on peut même sauvegarder son itinéraire sur son smartphone ! Enfin, des capteurs mesurent l'absorption des chocs afin d'évaluer l'usure de la semelle (que l'on ne peut malheureusement pas changer). La durée de vie des batteries lithium-ion que contient chaque chaussure varie de 8 heures à plusieurs semaines (tout dépend si on utilise le chauffage ou non). Elles se rechargent jusqu'à 500 fois sans fil, par simple induction. Mise en vente prévue pour début 2017. **S.F.**

Prix : env. 450 €
Rens. : www.digitsole.com/fr/smart-shoe/

La trottinette électrique branchée auto

Assemblée par l'entreprise suisse Micro et commercialisée par Peugeot, l'e-Kick peut se recharger en une heure dans le coffre de la Peugeot 3008, sur une station d'accueil alimentée par la batterie de la voiture. La recharge peut aussi s'effectuer sur une prise de courant domestique. Dotée d'une batterie lithium-ion de 80 Wh, l'e-Kick parcourt jusqu'à 12 km à 25 km/h grâce à son assistance électrique. B.P.

Prix : env. 1 200 € (+ 330 € la station d'accueil). Rens. : www.peugeotdesignlab.com



Ces capteurs transforment toute surface en clavier

Imaginez un bracelet flexible, doté de cinq orifices, dans lesquels passer vos doigts afin de transformer n'importe quelle surface (une table, une chaise...) en clavier ! Voici le concept de cette mitaine intelligente, baptisée Tap Strap. Créé par l'américain Tap Systems, le bracelet intègre une série de capteurs capables de détecter les mouvements des mains et des doigts. Ces informations sont traitées par un microcontrôleur puis transmises par signal Bluetooth à l'équipement associé. À chaque tapotement correspond alors un caractère ou une commande. Seul bémol, et non des moindres : avant la première utilisation, une petite heure est nécessaire pour paramétrer le Tap Strap afin qu'il associe correctement gestes et commandes. Or, avec 26 caractères pour le seul alphabet, plus les caractères accentués et la ponctuation, mieux vaut être doté d'une solide mémoire pour pouvoir utiliser efficacement cette interface et les combinaisons associées... Le Tap Strap fonctionne avec tous les appareils Bluetooth compatibles avec le standard HID, ce qui inclut téléphones et tablettes sous iOS et Android, les ordinateurs sous Windows et Mac OS et la plupart des téléviseurs intelligents. Commercialisation prévue d'ici quelques semaines. **E.T.-A.**



Prix : env. 110 €
Rens. : www.tapwithus.com

Où sont les étoiles sur les photos spatiales?

Question de Quentin Menou, Saint-Ouen (93)



Cette absence est liée au fort contraste entre les étoiles ténues en arrière-plan, et les spationautes et leur combinaison aspergée de lumière au premier plan… Car, dans l'espace, la lumière du Soleil dans le domaine visible est deux fois plus intense que sur Terre en plein midi (l'atmosphère en diffuse la moitié). *"Et puis tous les modules et les scaphandres sont blancs et réfléchissants afin d'éviter la chauffe, donc ils sont très lumineux"*, ajoute Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du système solaire au Centre national d'études spatiales.

Aussi les caméras sont-elles adaptées: diaphragme fermé au maximum et temps de pose très court, sans quoi les astronautes seraient surexposés. Et ce, que ce soit en orbite, sur la Station spatiale internationale ou sur la Lune, dont le sol absorbe pourtant 93 % de la lumière solaire.

TEMPS DE POSE MINIMUM

Cela vaut aussi pour les photos de planètes, y compris Pluton, même si le Soleil y brille 1500 fois moins que sur Terre… Voire pour celles de la comète Tchouri, *"plus noire que du charbon"*, captées par la sonde *Rosetta*. *"Lorsque l'on photographie le noyau cométaire, les poses sont inférieures à 1 s, et nous ne voyons pas les étoiles, trop faibles,* confirme Olivier Groussin, de la mission *Rosetta*. *Il n'y a que lorsque nous observons les jets et les grains dans la coma* [la chevelure de la comète] *que les temps de pose sont assez longs, plus de 1 min, pour laisser apparaître les étoiles."*

"Il en va de même pour notre œil, ajoute le spationaute Jean-François Clervoy. *Dans la Navette, il fallait éteindre les lumières du cockpit, les écrans d'ordinateurs, et orienter le vaisseau dos à la Terre et au Soleil, pour qu'au bout d'une dizaine de minutes on distingue enfin les étoiles par le hublot,* se souvient-il. *Se révélait alors un ciel couvert d'étoiles, qui, faute d'atmosphère, ne scintillent pas… C'est magnifique."* **B.R.**

Peut-on domestiquer une mouche?

Question de Lucas Foures, Verdun (55)





De façon très limitée. La mouche ne vivant que quelques jours, ses capacités cognitives sont restreintes. *"Il semble difficile de lui apprendre ce qui échappe totalement à ses caractéristiques biologiques,* indique Claudio Lazzari, chercheur à l'Institut de recherche sur la biologie de l'insecte (CNRS / université François-Rabelais). *Cependant, par croisement, on peut créer des souches de mouches qui répondent mieux à certains* stimuli [une lumière, une odeur, un choc thermique ou électrique…]. *Nous pouvons ainsi dresser ces individus à faire certaines choses, comme voler vers une figure particulière."* Comme dans les élevages de mouches destinées aux études scientifiques. Claudio Lazzari conclut: *"Elever une mouche est donc très différent d'élever un oiseau, par exemple, qui peut s'adapter à notre présence et interagir avec nous. Ce ne sera jamais le cas avec la mouche."* **F.C.**

La lumière du Soleil est si intense dans l'espace que les réglages adaptés aux spationautes ne permettent pas de photographier aussi les étoiles.

Manger le placenta a-t-il un intérêt pour la mère ?

Question de Davide Costa, Paris 20e

A ce jour, rien ne le prouve. La "placentophagie", à la mode surtout aux Etats-Unis, est parfois présentée comme aidant à lutter contre la dépression et la douleur post-partum, favorisant la production de lait maternel, ou améliorant l'élasticité de la peau. Sauf qu'une équipe américaine de la Northwestern University a scruté en 2015 une dizaine de travaux sur ce sujet, et n'a pu confirmer aucune de ces allégations. Il faut savoir par ailleurs qu'en France – où seuls 1 % des accouchements ont lieu à domicile –, il est interdit de récupérer son placenta. **K.B.**



Il n'est peut-être même pas prudent d'ingérer le placenta, sorte de filtre à toxines et polluants.

NASA - DR DAVID M PHILLIPS/BSIP - A.DAGAN

C'est vrai que les cheveux peuvent devenir tout blancs sous le coup d'une émotion ?

Question de Marion Sourt, Frayssinet-le-Gélat (46)

Non, car un cheveu, qu'il soit brun ou blanc, ne change pas de couleur au fil de sa croissance (voir infographie). *"La partie visible du cheveu est un tissu structurellement mort, il n'y a pas de vaisseaux sanguins ni de nerfs,* confirme Marcel Salvador, spécialiste du cheveu à Montpellier. *Il y a donc là une impossibilité physiologique et chimique de perdre sa couleur en quelques heures."*

Cela dit, de nombreux facteurs peuvent engendrer l'apparition brutale de cheveux blancs : les gènes, l'alimentation… ou le stress. *"A la suite d'un choc violent ou d'une frayeur, la consommation de vitamines, minéraux et oligoéléments nécessaires à la production de mélanine est démultipliée."* Or, le corps nourrit en priorité les organes vitaux : cerveau, cœur, foie… Les cellules épidermiques, elles, sont les dernières à réceptionner les éléments nutritifs. Résultat : l'individu peut être atteint de blanchiment précoce, ou "canitie".

Et que penser des cas de Marie-Antoinette ou Sir Thomas More, qui auraient vu leurs cheveux blanchir totalement la nuit précédant leur exécution ? Anne-Marie Skellett et ses collègues du département de dermatologie de l'hôpital universitaire de Norwich (R.-U.) avancent deux explications : soit les deux condamnés avaient les cheveux déjà blancs et n'avaient plus accès à leur teinture habituelle ; soit, sous le stress, ils auraient développé une réaction auto-immune appelée *Alopecia areata* : en rejetant le système pigmentaire du follicule pileux, leur organisme aurait fait tomber les cheveux colorés… sans toucher aux cheveux déjà blancs. **F.C.**

D'où viennent les tics nerveux ?

Question de Daniel Gautier, Boulogne-Billancourt (92)

Clignements des yeux, haussements répétitifs des épaules, tapotements involontaires du pied ou des doigts, reniflements mais aussi vocalises et cris… *"Tous ces tics caractérisés par des mouvements psychomoteurs anormaux sont dus à un retard de maturation du cerveau"*, explique Pierre Burbaud, neurologue au CHU de Bordeaux et responsable d'une consultation spécialisée dans la prise en charge des tics.

Plus précisément, ajoute-t-il, *"dans le cerveau, il existe une zone, le striatum, qui joue un rôle dans la planification des comportements et des gestes routiniers* [nos habitudes comportementales]. *En temps normal, son activité est contrôlée par des projections nerveuses en provenance du cortex. Mais chez les personnes souffrant de tics, ces projections nerveuses corticales ne sont pas suffisamment matures pour exercer ce contrôle. Il en résulte des mouvements ou des cris qui s'expriment en dehors du bon contexte"*.

Bénins la plupart du temps, les tics concernent en majorité les enfants et disparaissent le plus souvent à l'adolescence ou au début de l'âge adulte, le cerveau ayant alors rattrapé son retard de maturation. Néanmoins, dans 15 à 20 % des cas, et en particulier pour les formes sévères (notamment le fameux syndrome de Gilles de la Tourette), les tics perdurent à l'âge adulte. Pour les traiter, différentes méthodes de psychothérapie ont fait la preuve de leur efficacité. En cas d'échec, certains médicaments peuvent également être prescrits. **C.H.**

A.DAGAN - BIOSPHOTO/JOHN DANIELS/ARDEA

Tous les

Question de Sara Marini,

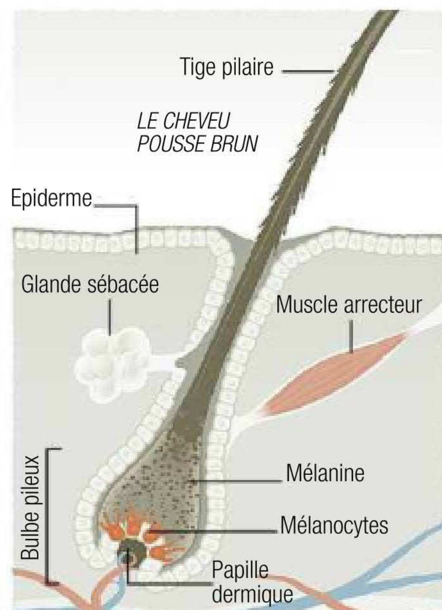
En théorie, oui. Du chihuahua, chien le plus petit du monde (moins de 20 cm de haut), au doberman, l'un des plus grands (jusqu'à 90 cm au garrot), toutes les races de chiens appartiennent à la même espèce : *Canis lupus familiaris*. Par définition, une espèce est un groupe d'êtres vivants capables de se reproduire entre eux et de donner une descendance fertile. Mais, en pratique, cela peut poser de sérieux problèmes anatomiques… Du coup, des croisements entre chiens de taille très différente n'est pas du tout recommandé.

Non, car le cheveu ne devient pas blanc, il pousse blanc

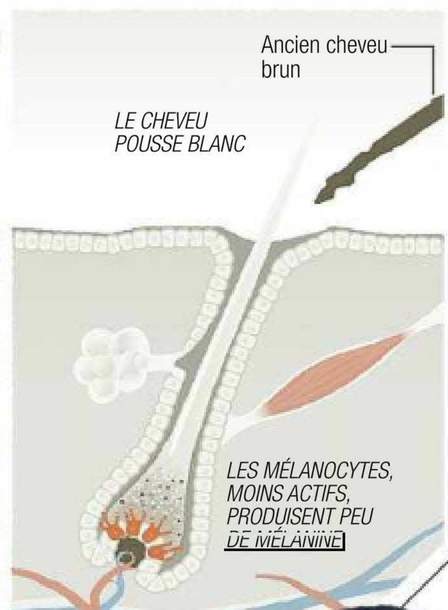
1 Un cheveu brun pousse La phase active d'un cheveu dure plusieurs années. Sa couleur lui est donnée par la mélanine, un pigment produit par les mélanocytes au niveau de la racine du cheveu.

2 En fin de cycle, il meurt Après avoir poussé pendant 3 à 5 ans, le cheveu meurt. Le follicule pileux se resserre. Le cheveu tombera dans les 2 à 3 mois qui suivent, poussé par son successeur.

3 Un autre pousse blanc A partir d'un certain âge, la baisse d'activité des mélanocytes se traduit par une dépigmentation du nouveau cheveu, qui poussera blanc pour la durée du cycle.







chiens s'apparient-ils ?

Marseille (13)

Dans le cas où c'est la femelle qui est le plus gros des deux, il est en effet difficile pour le mâle de la monter. *"Cela dit, j'ai déjà vu un mâle teckel (moins de 40 cm) s'accoupler avec une femelle berger allemand (jusqu'à 65 cm)… en montant sur un parpaing !"*, raconte Anne Gogny, spécialiste européenne en reproduction animale au Centre hospitalier universitaire vétérinaire d'Oniris, à Nantes. Mais c'est surtout lorsque le plus gros des deux est le mâle que les problèmes deviennent aigus. *"Il est rare que la femelle accepte d'être montée, car l'intromission est presque impossible, ou alors elle occasionne de graves blessures au niveau des organes génitaux, aussi bien chez le mâle que chez la femelle"*, précise Anne Gogny.

MISE BAS MORTELLE

De plus, les futurs chiots peuvent être trop gros pour permettre une mise bas par les voies naturelles. *"Cela peut induire une difficulté mécanique à accoucher. Et en l'absence de césarienne, la mère et les chiots meurent inévitablement lors de l'accouchement…"* Sans compter que, si ce dernier se passe bien, *"le fruit de ce croisement combinera des traits fort éloignés : ceux d'un chien d'agrément et ceux d'un chien de garde ; or à la base, ces deux races dérivent justement d'une sélection opérée par l'homme dans le but de développer pour l'un les caractères faisant de lui un bon chien d'agrément, et pour l'autre les particularités faisant de lui un bon molosse"*.

Voilà pourquoi, si une femelle de petite taille s'échappe pendant ses chaleurs et se révèle ensuite gravide, *"il est important de surveiller la gestation, voire de procéder à un avortement si on ne sait pas quel type de mâle l'a saillie"*. **K.B.**



Qu'est-ce qui fait que la feuille d'aluminium résiste à la



Bon conducteur de chaleur, l'aluminium en emmagasine peu et ne la conserve pas

Question de François Dubuc, Le Havre (76)

"Deux propriétés de l'aluminium expliquent ce phénomène, détaille Ariel Fenster, chimiste et professeur à l'université McGill, au Canada. *D'abord, c'est un excellent conducteur de chaleur. Lorsqu'on place une feuille d'aluminium au four, sa température augmente. Mais dès qu'on la sort, la chaleur se dissipe instantanément. La feuille, très fine, ne conserve pas la chaleur."* C'est la raison pour laquelle l'aluminium est un composé que l'on retrouve souvent au cœur des systèmes de refroidissement, dans l'automobile ou l'informatique.

Seconde propriété : *"L'aluminium réfléchit la chaleur, il en emmagasine donc moins"*, complète le spécialiste. Un pouvoir réflecteur utilisé pour protéger les cosmonautes de la chaleur, grâce à des combinaisons dotées d'un matériau aluminisé. Autre utilisation de l'aluminium : les couvertures de survie, qui ont un double usage en permettant, au choix, de se protéger des rayons solaires ou de limiter les déperditions de chaleur corporelle. **N.P.**

Si on tire un coup de feu en l'air, la balle qui retombe peut-elle tuer quelqu'un ?

Question de S. Suaudeau-Pustoch, Rezé (44)

Oui, car la vitesse avec laquelle une balle tirée en l'air retombe est suffisante pour transpercer n'importe quelle partie du corps humain.

Une balle de fusil tirée vers le ciel (à un angle précis de 90° par rapport au sol) peut atteindre une altitude de 2 750 mètres ; elle mettra 19 secondes pour monter et pratiquement deux fois plus de temps pour retomber. Pendant sa chute, sa vitesse sera alors comprise entre 90 mètres et 180 mètres par seconde.

Or, comme le souligne Vassili Swistounoff, expert en balistique, *"60 mètres par seconde, soit 220 km/h, suffisent pour qu'un objet de la taille d'une bille transperce la peau ou provoque une blessure fatale"*.

Même si la probabilité pour qu'elle retombe sur quelqu'un est faible, *"il existe effectivement des cas de personnes touchées par des balles tombantes"*, déplore Laurent Pierre, expert en armes auprès de la cour d'appel de Paris.

Des accidents se sont notamment produits aux Etats-Unis. Culturellement acceptés dans certaines régions lors de fêtes nationales, des tirs de célébrations y ont même déjà provoqué la mort ! **M.-A.P.**

GAGNEZ UN ABONNEMENT D'UN AN À SCIENCE & VIE

Cette rubrique est la vôtre, écrivez-nous !

Nous ne pourrons répondre à tous, mais les auteurs des questions sélectionnées se verront offrir un abonnement d'un an à la version numérique de *Science & Vie* (pour eux-mêmes ou une personne de leur choix).

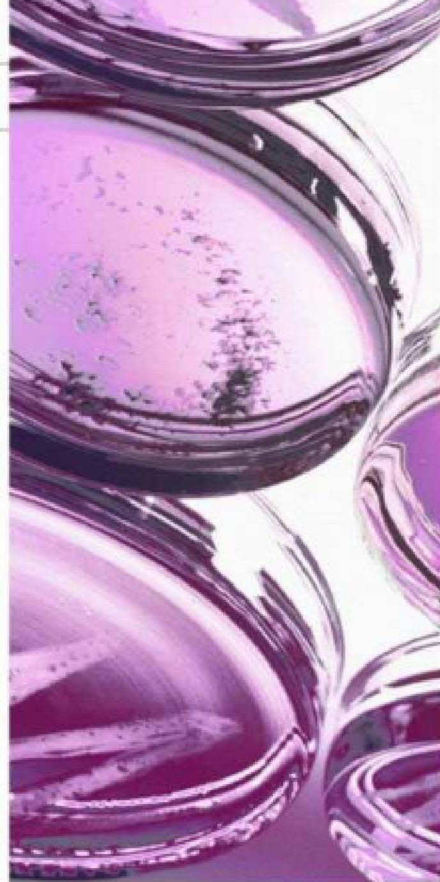
Envoyez vos questions, en indiquant clairement votre adresse postale, à : sev.qr@mondadori.fr ou bien par courrier à :

SCIENCE & VIE
QUESTIONS/RÉPONSES
8, rue François-Ory
92543 MONTROUGE CEDEX

SHUTTERSTOCK

Enquête sur un phénomène en expansion : les chercheurs “fraudeurs”

La face cachée de la science



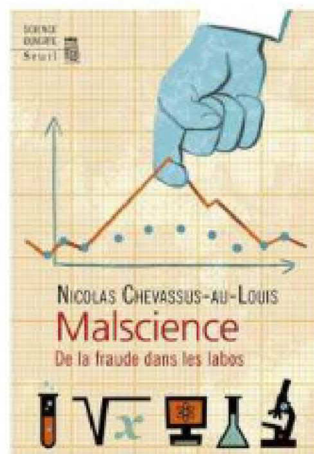
La science serait-elle menacée de l’intérieur, par une montée en puissance de la fraude ? C’est le constat noir que dresse le journaliste Nicolas Chevassus-au-Louis dans son dernier livre, *Malscience, De la fraude dans les labos*. Pas moins de 2 % des scientifiques interrogés de manière anonyme reconnaissent en effet avoir inventé ou falsifié des données, soit tout de même 140 000 chercheurs “fraudeurs” dans le monde !

DES RÉSULTATS EN FAVEUR DES FINANCEURS

On assiste depuis quelques années à une multiplication des découvertes de fraudes massives ainsi qu’à une explosion du nombre de rétractions d’articles (c’est-à-dire de retraits d’articles de la littérature scientifique), notamment en biologie. Au-delà d’exemples frappants de *“serial fraudeurs”*, le livre expose comment cette *“malscience”* peut être le fait de petits mensonges, de petits arrangements quotidiens avec la vérité. Notamment de la part des jeunes chercheurs, dont le poste dépend bien souvent du nombre d’articles qu’ils parviendront à publier durant leurs premières années. Les scientifiques seniors ne sont pourtant pas en reste, en particulier ceux dont les recherches sont financées par l’industrie : une étude montre que ces chercheurs ont une tendance accrue à trouver des résultats allant dans le sens des intérêts de leurs financeurs… Nous avions publié il y a huit ans une large enquête sur le sujet (n°1094, p. 56).

“Est-ce bien grave, pourrait-on dire, tant que la science progresse ?”, s’interroge l’auteur. Le problème, c’est que cette fraude, petite ou grande, met à mal l’ensemble de la recherche. D’abord parce qu’elle représente un incroyable gâchis d’argent : des milliards d’euros sont investis dans des études frauduleuses, alors qu’ils auraient pu servir à produire d’authentiques connaissances. Sans parler du temps perdu par des centaines d’équipes pour tenter de reproduire des expériences truquées.

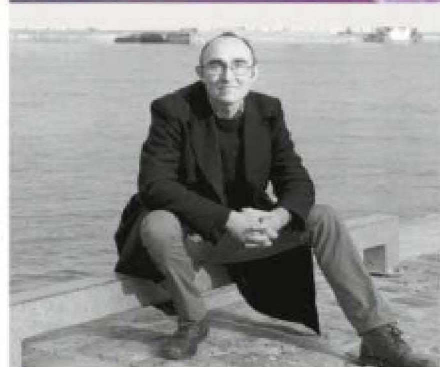
Plus grave : ces fraudes, qui s’exercent de manière particulièrement marquée dans le domaine biomédical, peuvent avoir des



▸ ***Malscience - De la fraude dans les labos***
▸ de Nicolas Chevassus-au-Louis
▸ éditions du Seuil
▸ 208 pages, 18 €

conséquences graves sur la santé. Un chercheur a ainsi estimé qu’environ 6 500 patients avaient reçu, aux Etats-Unis, des traitements expérimentaux pour des essais cliniques par la suite rétractés pour fraude !

Dans son dernier chapitre, intitulé “Pour une science lente”, l’auteur appelle à cesser la compétition scientifique à outrance et plaide pour le partage des données brutes des expériences, ce qui permettrait de vérifier plus aisément les résultats. *“Pour retrouver sa qualité, la science doit ralentir”*, défend-il. **Lise Barnéoud**



GREG PEASE/GETTY - HERMANCE TRIAY

S&V : Comment définit-on la fraude en science ?

Nicolas Chevassus-au-Louis : On parle de fraude quand un chercheur invente des données, quand il vole celles des autres ou quand il falsifie le résultat de ses expériences. Ce dernier cas est le plus intéressant car le plus complexe. Le quotidien d’un laboratoire est fait de mille et un petits arrangements avec la rigueur. Tous les chercheurs le reconnaissent. On enlève un point de mesure “parce qu’il sort de la courbe”, on ne rapporte

Mesures ignorées, résultats et statistiques bien choisis… : du manque de rigueur à la fraude, il n'y a qu'un pas.

NICOLAS **CHEVASSUS-AU-LOUIS**
Journaliste indépendant

"C'est l'intensification de la pression à publier qui engendre les fraudes"

que les expériences "qui marchent", on change de test statistique pour faire émerger un résultat significatif… Et il est impossible de dire où finit ce cuisinage et où commence la fraude.

S&V : Y a-t-il réellement de plus en plus de fraudeurs ou est-ce parce qu'on les traque plus qu'on en voit plus ?

N.C. : Il est certain qu'internet, en permettant notamment d'échanger entre spécialistes au sujet d'articles publiés (comme sur le site PubPeer, créé par un chercheur du CNRS), a accéléré la découverte de fraudes. De même, il existe désormais des logiciels de détection des plagiats ; d'autres, en identifiant les retouches d'images, aident à démasquer les embellissements frauduleux de clichés expérimentaux. Mais je reste persuadé que la fraude scientifique est en expansion. Le taux de rétraction d'articles pour fraude augmente trois fois plus vite que celui pour erreur de bonne foi ; or, si la communauté scientifique était de plus en plus rigoureuse dans la traque des erreurs de toute provenance, les deux devraient augmenter à la même vitesse.

S&V : De plus en plus, les organismes de recherche se dotent de commissions dédiées à l'intégrité scientifique, de procédures… Parviendra-t-on à réduire la malhonnêteté scientifique ?

N.C. : Non, tant que l'on ne s'attaquera pas au cœur du problème, qui est l'intensification de la pression à publier. Pour avoir plus de financements, souvent même pour maintenir son salaire, un chercheur doit publier très régulièrement. Tant que l'on n'aura pas admis que la recherche scientifique, comme toute activité créatrice, a besoin de temps, qu'un chercheur peut, par moments, ne rien trouver, on n'aura pas réglé la question de la fraude.

Propos recueillis par L.B.

FILM



A Beautiful Planet
- de Toni Myers
- Jusqu'au 29 janvier 2017
- La Géode, 26, av. Corentin-Cariou, 75019 Paris
- 12 € (tarif réduit : 9 €)

La Géode se transforme en Station spatiale internationale. Pour un voyage orbital d'une petite heure à 350 km d'altitude, embarquez avec une douzaine d'astronautes, partagez leur quotidien de microgravité, et ressentez à la fois l'exiguïté de la station spatiale et l'immensité de l'espace qui vous entoure. Avec son écran à 180°, la Géode immerge complètement dans l'espace et offre des images inédites de notre Terre, que seuls connaissaient jusqu'ici les chanceux spationautes. Ou comment décoller les deux pieds bien au sol. **T.C.-F.**

LIVRE



Dans l'œil du pigeon
Evolution, hérédité et culture
- de Luc-Alain Giraldeau
- éd. Le Pommier, 189 pages, 19 €

Où un écologiste comportemental s'amuse à remettre l'humain à sa place, celle d'un animal, culturel certes, mais qui reste un "véhicule de gènes". Cette série de leçons accessibles rappelle l'importance de la biologie de l'évolution pour comprendre l'humain dans toute sa complexité : nos sentiments, notre culture ne se sont pas développés indépendamment de nos gènes. Des introductions – parfois trop – rapides à des sujets sensibles qui ont le mérite de bousculer les certitudes et d'inciter à un approfondissement, à travers les ouvrages de référence cités en début de chapitres. **E.A.**

Novembre 1866

Ludwig Boltzmann découvre le secret de l'entropie

Plongé dans sa baignoire, Ludwig Boltzmann observe l'eau chaude qui se mêle à l'eau froide. En ce mois de novembre 1866, une question l'obsède : pourquoi l'eau du bain, devenue tiède, ne se re-sépare ensuite jamais d'elle-même en eau chaude et froide ? Pourquoi le mélange, une fois fait, se révèle toujours irréversible ?

A 22 ans, alors qu'il s'apprête à recevoir son titre de docteur et devenir professeur assistant à l'Institut de physique de l'université de Vienne, le jeune Ludwig a aussi, on s'en doute, d'autres préoccupations matérielles en tête. Celle-ci est pourtant moins anodine qu'il n'y paraît… Car, après tout, les lois de la mécanique étant parfaitement symétriques par rapport au temps, rien n'interdit aux molécules d'eau tiède de refaire leur parcours en sens inverse. Dérouler "à l'envers" le film du mélange ne violerait aucune équation connue. Alors pourquoi cela n'arrive-t-il jamais ?

"UNE FLÈCHE DU TEMPS"

Boltzmann sait qu'il n'est pas le seul à se poser cette question. Elle intrigue les plus grands physiciens de son époque. Comme l'Allemand Rudolf Clausius qui, dix ans plus tôt, érigeait en principe cette observation jamais mise en défaut : la chaleur circule toujours du corps chaud vers le corps froid. On ne peut obtenir l'inverse sans fournir un travail. Un principe – le second de la thermodynamique – que Clausius a théorisé, l'année précédente, en introduisant un nouvel acteur, l'entropie. Qui a une propriété essentielle : dès lors que le système étudié est isolé, elle ne peut que croître, empêchant ainsi tout retour du système en arrière.

Boltzmann ne sait que penser de ce concept ambigu : cette énergie, qui n'en est pas vraiment une, s'exprime dans toute transformation impliquant du travail mécanique et de la chaleur. Il essaie de comprendre pourquoi elle ne peut que croître à partir d'un système simple : un gaz de molécules sans autre interaction que leurs collisions. L'idée d'une matière faite de molécules élémentaires est alors loin de faire l'unanimité. Les physiciens allemands, en particulier, la combattent farouchement. Boltzmann s'y accroche en déroulant un raisonnement qui va changer le cours de la physique.

Si l'on connaissait la position et la vitesse de chaque molécule, on pourrait, grâce aux lois de la mécanique, en déduire l'évolution du gaz à chaque instant. C'est bien sûr impossible, puisqu'il y en a des milliards de milliards dans le moindre centimètre cube. Mais on peut faire des moyennes. C'était déjà l'idée de Clausius et de James Clerk Maxwell, qui détermina en 1860 une fonction de distribution en forme de cloche. Elle donne, selon la température, la probabilité de trouver chaque molécule du gaz à un endroit donné à une certaine vitesse.

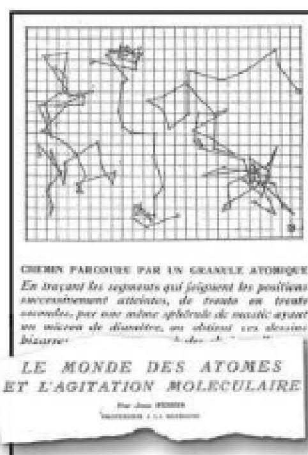
Dans un article qu'il vient de publier dans les *Wiener*

ARCHIVE OF THE UNIVERSITY OF GRAZ - SPL/AKG

SCIENCE&VIE en parlait déjà… PAR FIORENZA GRACCI

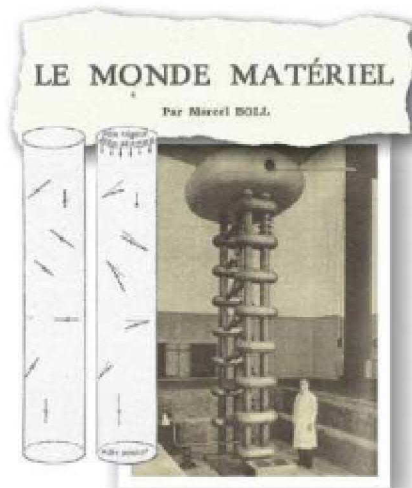
1913 LE GRAND DÉSORDRE DES MOLÉCULES

L'entropie émerge au cœur de la matière et *S&V* s'en fait l'écho dès son 3e numéro : *"Les molécules d'un fluide* […] *sont en mouvement incessant. L'équilibre* […] *de l'eau que nous voyons dans un verre, par exemple, ne serait donc qu'une apparence cachant un certain régime permanent d'agitation désordonnée."* Qui *"échappe à notre perception directe comme le mouvement des vagues* […] *échappe à l'observateur trop éloigné".* ***S&V* n° 3**



1938 LA STATISTIQUE S'INVITE EN PHYSIQUE

Pour son 25e anniversaire, *S&V* consacre un numéro spécial à la matière : en physique, parmi les *"notions qui ont si profondément bouleversé notre connaissance du monde extérieur"* figure la *"statistique de Boltzmann, qui régit les gaz usuels, comme l'air atmosphérique ou le 'vide'".* ***S&V* n° 258**



Professeur de physique à l'université de Graz, Ludwig Boltzmann réussit à démontrer à partir de l'étude d'un simple gaz de molécules que l'entropie croît de manière irréversible : le temps a donc un sens.



Berichte, Boltzmann s'est appuyé sur cette fonction de Maxwell. Il en a déduit, lors d'une transformation quelconque du gaz, la variation moyenne de l'énergie liée au mouvement des molécules. Voilà, affirme-t-il, l'origine de la chaleur échangée. En la divisant par la température, il a obtenu la fameuse entropie, à partir d'une formule tirée des travaux de Clausius, et démontré que cette entropie ne pouvait effectivement que croître lors d'un processus irréversible. Résultat majeur pour démarrer, à 22 ans, une carrière. Mais Boltzmann reste un sombre inconnu dont l'article n'est guère lu.

Le jeune Viennois va continuer pendant six ans à creuser la question : comment un principe, qui revient à mettre une →



LE HASARD PUR N'EXISTE PAS

C'EST L'ÉNERGIE QUI CRÉE L'INSTABILITÉ ET PUIS L'ORDRE

1994 **COMMENT L'ORDRE S'INSTALLE DANS LA VIE**

"Comme l'a montré Boltzmann, c'est l'état d'entropie maximum, donc le plus désordonné, qui est le plus probable. De là à en conclure que les systèmes vivants, structures ordonnées par excellence, n'avaient aucune chance de voir le jour, il n'y a qu'un pas." L'Ecole de Bruxelles détruit cette conception, en démontrant que *"pour des systèmes non isolés, l'état final d'équilibre thermodynamique n'est pas forcément l'état désordonné"*. D'où la possibilité de la vie et *"l'irréversibilité de toute évolution naturelle"*! ***S&V* n° 683** @

flèche au temps, peut-il émerger d'un système dont chaque molécule obéit à des lois symétriques par rapport à ce même temps ?

MESURER LE DÉSORDRE

Devenu professeur à l'université de Graz, Boltzmann commencera à y répondre en 1872, dans un mémoire où il décrit l'évolution dans le temps de la loi de distribution des vitesses de Maxwell. Ce qui permet d'expliquer l'évolution des caractéristiques d'un gaz à notre échelle (température, pression, viscosité…) en fonction du comportement moyen des molécules qui le constituent. Car si chaque particule est imprévisible, l'évolution d'un très grand nombre devient, en effectuant des moyennes, parfaitement connue. Une démarche puissante qui donnera naissance à la physique statistique…

Mais il lui faudra encore quelques années pour comprendre ce que sous-tendent ses équations : les configurations possibles de molécules qui expriment une eau tiède sont, à chaque instant, immensément plus nombreuses que celles traduisant une eau plus froide d'un côté et plus chaude de l'autre (il n'y a, dans le cas extrême, qu'une seule configuration dans laquelle toutes les molécules chaudes, c'est-à-dire rapides, sont d'un côté et toutes les molécules froides, ou lentes, de l'autre). Du coup, même si le système évolue au hasard parmi toutes ces configurations possibles, le résultat est qu'il opte chaque fois pour la tiédeur ; les autres cas de figure n'étant pas rigoureusement impossibles, mais infiniment moins probables. Vu le nombre immense de molécules contenues dans un volume d'eau, il faudrait attendre un temps supérieur à l'âge de l'Univers pour avoir une chance raisonnable de les observer !


Les travaux de Boltzmann (au centre, en 1887, à Graz) ne sont guère sortis d'un cercle restreint : une déception qui a alimenté sa dépression.

ARCHIVE OF THE UNIVERSITY OF GRAZ

Boltzmann démontrera que ce nombre de configurations microscopiques possibles, compatibles avec l'état que l'on observe à notre échelle, est justement ce que mesure l'entropie. Mathématiquement, cette entropie est proportionnelle à ce nombre de configurations (plus précisément à son logarithme). Dès lors, son sens intime se dévoile : l'entropie mesurerait, en quelque sorte, le degré de désordre interne du système (l'ordre ultime se traduisant par une seule configuration moléculaire possible). Laissé à lui-même, un système évolue spontanément vers l'état le plus probable, celui qui correspond au plus grand nombre de configurations différentes. Son entropie croît donc au fil du temps.

Celui de Boltzmann, en revanche, est compté. Dès la fin des années 1880, il souffre d'épisodes de dépression de plus en plus aigus. Au point de mettre fin, de façon tout à fait irréversible, à ses jours le 5 septembre 1906. Sur sa tombe, à Vienne, sera gravée la fameuse relation mathématique liant l'entropie au désordre microscopique, qui ne pouvant que croître, donne à jamais sa flèche au temps.

E.Monnier

SCIENCE&VIE en parlait encore

2003 D'OÙ VIENT LE TEMPS ?

S&V présente une expérience "historique" : *"Dans les sous-sols de l'université de Genève, des physiciens ont démontré que le temps n'a pas cours dans le monde quantique !"* Comment peut-il alors émerger à notre niveau ? La réponse qui s'esquisse prolonge celle de Boltzmann : ce serait "*une conséquence de notre incapacité à traiter le très grand nombre d'informations élémentaires en jeu lors de phénomènes macroscopiques*". ***S&V* n° 1024**



2005 ET SI TOUT N'ÉTAIT QU'UNE HALLUCINATION !

"Les lois qui régissent l'infiniment petit" sont si incompréhensibles que les physiciens tentent de les *"reconstruire* […] *en termes purement informationnels"*. Ce fut Boltzmann *"qui, le premier, fit sauter le verrou en prônant une posture épistémologique"* : l'entropie peut être interprétée comme une mesure du désordre… et donc de la quantité d'informations inconnues sur la position et la vitesse des molécules du système. ***S&V* n° 1057**




à lire en intégralité dans **Les grandes archives** www.science-et-vie.com